

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки
Кафедра електронних пристроїв та систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«__» _____ червня _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електронні прилади та пристрої»
спеціальності 171 «Електроніка»**

**на тему: «Трифазний фільтро-компенсаційний перетворювач
вітрогенератора»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ДЕ-11

Вакуленко Іван Андрійович _____

Керівник:

Професор кафедри ЕПС, д.т.н., професор

Ромашко Володимир Якович _____

Консультант з технічної частини:

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент

Клен Катерина Сергіївна _____

Рецензент:

Декан Факультету електроніки, д. т. н., професор,

Найда Сергій Анатолійович _____

Консультант

з нормоконтролю

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент

Батрак Лариса Миколаївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«21» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Вакуленку Івану Андрійовичу

1. Тема проєкту «Трифазний фільтро-компенсаційний перетворювач вітрогенератора»

керівник проєкту Ромашко Володимир Якович д.т.н., проф. кафедри ЕПС

затверджені наказом по університету від «03» червня 2025 р. №1885-с

2. Термін подання студентом проєкту: 12 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту: вітрогенератор FT-2000 L2, потужність 2 кВт, напруга 96 В, швидкість вітру 10 м/с, трифазне навантаження - випрямляч

4. Зміст пояснювальної записки: огляд сучасного стану вітроенергетики у світі та в Україні, класифікація вітрогенераторів і аналіз їх ефективності, розгляд причин втрат у силовій електроніці та методів компенсації реактивної потужності, розрахунок режимів роботи ФКП та параметрів силових елементів, побудова моделі в MATLAB Simulink, дослідження впливу ФКП на мережу вітрогенератора та оцінка ефективності моделі. _

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична функціональна, часові діаграми та інтервальні схеми, схема електрична принципова.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний розділ	к.т.н., доц. кафедри ЕПС, Клен Катерина Сергіївна		

7. Дата видачі завдання: 21 травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд літератури з вітроенергетики та засобів компенсації реактивної потужності	21.05.2025 – 24.05.2025	
2	Обґрунтування доцільності використання паралельного ФКП	25.05.2025 – 26.05.2025	
3	Теоретичний аналіз принципу роботи та режимів ФКП	27.05.2025 – 28.05.2025	
4	Розрахунок струмів, вибір елементної бази силової частини	29.05.2025 – 30.05.2025	
5	Побудова моделі трифазного навантаження та вітрогенератора в MATLAB Simulink	31.05.2025 – 01.06.2025	
6	Розробка та інтеграція моделі фільтро-компенсаційного перетворювача	02.06.2025 – 03.06.2025	
7	Створення вимірювальних блоків для оцінки показників якості енергії	04.06.2025 – 05.06.2025	
8	Проведення моделювання з і без ФКП, збір результатів	06.06.2025 – 07.06.2025	
9	Аналіз ефективності роботи моделі, обробка результатів	08.06.2025 – 09.06.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки та підготовка доповіді	10.06.2025 – 15.06.2025	
11	Захист дипломної роботи	17.06.2025	

Студент

Іван ВАКУЛЕНКО

Керівник

Володимир РОМАШКО

Консультант

Катерина КЛЕН

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячений розробці теоретичної моделі трифазного фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП) паралельного типу для системи малої вітроенергетики. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності перетворення енергії у вітрогенераторах шляхом компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонік струму. Розглянуто існуючі пасивні та активні методи корекції коефіцієнта потужності, серед яких найбільш ефективним для малопотужних автономних джерел є використання паралельного ФКП.

Метою проєкту є дослідження роботи паралельного ФКП та розробка алгоритму його керування з урахуванням режимів компенсації реактивної потужності та гармонік. У ході роботи виконано структурно-функціональний аналіз системи, розраховано інтервальні режими роботи перетворювача, побудовано часові діаграми керування ключами. Проведено моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, що підтвердило правильність обраної концепції.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення якості електроенергії у вітроенергетичних системах низької потужності.

Ключові слова: електроніка, вітрогенератор, реактивна потужність, коефіцієнт потужності, фільтр гармонік, перетворювач.

ANNOTATION

The diploma project is devoted to the development of a theoretical model of a three-phase shunt active power filter (SAPF) for small-scale wind energy systems. The relevance of the topic is due to the need to improve energy conversion efficiency in wind turbines through reactive power compensation and harmonic current filtering. Existing passive and active power factor correction methods are reviewed, with the shunt active filter identified as the most effective solution for low-power autonomous systems.

The aim of the project is to study the operation of a shunt active power filter and to develop a control algorithm considering both reactive power and harmonic compensation modes. A structural and functional analysis of the system was carried out, operating intervals were calculated, and switching diagrams were constructed. Simulation was performed in MATLAB/Simulink, confirming the correctness of the proposed concept.

The results of the research can be used to improve power quality in low-power wind energy systems.

Keywords: electronics, wind turbine, reactive power, power factor, harmonic filter, converter.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ФІЛЬТРО- КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	12
1.1 Тенденції розвитку вітрогенерації в світі.....	12
1.2 Тенденції розвитку вітрогенерації в Україні	13
1.3 Класифікація вітрогенераторів та їх ККД	14
1.4 Втрати у силовій електроніці вітрогенератора	16
1.5 Пасивні засоби підвищення коефіцієнту потужності	18
1.6 Активні засоби корекції коефіцієнту потужності	19
1.7 ФКП паралельного типу.....	23
Висновки до першого розділу	27
2. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РОБОТИ ТРИФАЗНОГО ФІЛЬТРО- КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	29
2.1 Технічні параметри системи вітрогенератора	29
2.2 Принцип дії паралельного ФКП.....	31
2.3 Режими роботи компенсатора	33
2.4 Аналіз роботи транзисторів у кожному інтервалі	36
2.5 Аналіз і розрахунок струмів та номіналів у силових елементах	38
Висновки до другого розділу.....	41
3. ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВІТРОГЕНЕРАТОРА	43

					<i>ДП.ДЕ11.03.000 ПЗ</i>													
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Трифазний фільтро- компенсаційний перетворювач</i>						<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>					
<i>Розроб.</i>		Вакуленко І. А.															7	59
<i>Перевір.</i>		Ромашко В. Я.																
<i>Н. Контр.</i>		Батрак Л.М.																
<i>Затверд.</i>		Ромашко В. Я.																
												<i>«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-11</i>						

3.1 Вибір середовища моделювання та побудова моделі мережі вітрогенератора	43
3.2 Реалізація моделі фільтро-компенсаційного перетворювача.....	47
3.3 Результати моделювання.....	49
3.4 Аналіз ефективності роботи моделі.....	55
ВИСНОВКИ.....	59
ДОДАТОК А.....	65
ДОДАТОК Б	66
ДОДАТОК В.....	67
ДОДАТОК Г	68
ДОДАТОК Ґ.....	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ФКП – фільтро-компенсаційний перетворювач;

РРК – режим роботи компенсатора;

ПГС – повне гармонійне спотворення (англ. THD - Total harmonic distortion)

ШІМ широтно-імпульсна модуляція

					ДП ДЕ11 03.000.ПЗ	Арк
Змн	Арк	№ докум.	Піппис	Дата		9

ВСТУП

У сучасному світі, де енергетичні потреби невинно зростають, а екологічні виклики стають дедалі гострішими, вітроенергетика виступає ключовим елементом сталого розвитку. Вітрові електростанції займають дедалі помітніше місце в енергетичному балансі як України, так і світу. Проте, їхня інтеграція в енергомережі нерідко супроводжується певними проблемами. Часто функціонування вітрогенераторів призводить до погіршення якості електроенергії: виникають гармонічні спотворення, знижується коефіцієнт потужності, зростають втрати. Ці фактори негативно впливають на роботу обладнання та стабільність усієї системи.

Для вирішення зазначених проблем, ще з кінця минулого століття, із розвитком потужної силової електроніки, увагу інженерів привернули активні фільтри потужності. Ці пристрої, на відміну від пасивних аналогів, є значно гнучкішими та ефективнішими. Вони здатні в реальному часі усувати гармоніки, покращувати коефіцієнт потужності та коригувати спотворення, що суттєво підвищує якість електроенергії. По суті, силовий активний фільтр є складним перетворювачем, що використовує накопичувач енергії на постійному струмі та, за допомогою широтно-імпульсної модуляції, точно формує компенсуючий струм. Досвід вітчизняних та зарубіжних вчених підтверджує: активна фільтрація є надзвичайно перспективним напрямком у перетворювальній техніці.

Основні переваги таких фільтрів очевидні: вони працюють в реальному часі, дозволяють одночасно компенсувати численні гармоніки, що робить обладнання компактнішим, та можуть повністю усувати гармоніки напруги чи струму незалежно від їхніх фази та амплітуди. Крім того, потужність компенсації легко нарощується паралельним підключенням, а система повністю позбавлена резонансів і не потребує додаткових налаштувань. Якість електроенергії сьогодні — це не просто технічний параметр, а важливий

									Арк
									10
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата	ДП ДЕ11 03.000.ПЗ				

чинник, що впливає на споживання, технологічні процеси та термін служби електрообладнання.

Водночас, деякі аспекти роботи активних фільтрів, зокрема їхня динаміка та взаємодія з електроприводами змінного струму, ще потребують глибшого вивчення.

Дана бакалаврська робота має на меті обґрунтування та аналіз роботи трифазного фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП) паралельного типу для інтеграції з вітрогенератором з метою підвищення якості електричної енергії та ефективності функціонування системи. У рамках дослідження буде проведено аналіз розвитку вітроенергетики, вивчення втрат у силовій електроніці та існуючих методів корекції потужності. Буде детально розглянуто принципи роботи паралельного ФКП, його режими та аналіз транзисторів. Ключовим етапом стане теоретичний розрахунок струмів і напруг у силових елементах ФКП та обґрунтування їхніх номіналів. Також буде виконано моделювання роботи системи "вітрогенератор - навантаження - ФКП" для підтвердження теоретичних викладок та оцінки ефективності перетворювача.

Основна увага зосереджується на процесах забезпечення якості електроенергії та компенсації реактивної потужності у вітроенергетичних системах, досліджуючи саме трифазний фільтро-компенсаційний перетворювач. У роботі застосовуються системний аналіз для вивчення тенденцій, теоретичні основи електротехніки та силової електроніки, а також методи математичного моделювання.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

– комбінування різних джерел енергії — газопоршневих установок, газових турбін, сонячних панелей, акумуляторів, вітроустановок, а також когенераційних систем;

– максимальне наближення до споживача — споживачі стають активними учасниками виробництва енергії, встановлюючи власні джерела;

– енергонезалежність і безпека — виведення з ладу одного об'єкта не призводить до відключення великої кількості споживачів по всій країні;

– розвиток регіональної економіки — створення нових робочих місць у регіонах, стимулювання інноваційного розвитку.» [9].

Держава економічно стимулює та підтримує розвиток малої енергетики. А технологічний розвиток сприяє збільшенню коефіцієнту корисної дії та зменшенню вартості обладнання. Переліченні вище чинники сприяють зросту популярності малопотужних вітроустановок.

1.3 Класифікація вітрогенераторів та їх ККД

Залежно від установленної потужності вітрогенератори поділяються на три основні категорії [10]:

Мала вітрова генерація — це вітрогенератори з одиничною потужністю до 10–20 кВт. Основне призначення таких установок — забезпечення автономного електропостачання дрібних споживачів і господарських об'єктів, зокрема стільникових базових станцій, окремих приватних домогосподарств або допоміжних господарських споруд.

Середня вітрова генерація охоплює установки потужністю від 20 до 500 кВт. Такі системи здатні забезпечувати електропостачання невеликих і середніх об'єктів, зокрема готелів, виробничих майданчиків, військових баз, об'єктів соціальної інфраструктури тощо.

Велика вітрова генерація включає установки з одиничною потужністю від 500 кВт до 5 МВт. Основним призначенням таких систем є промислове

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>14</i>

виробництво електричної енергії для подальшої передачі в загальну енергосистему.

Наразі набирають популярність малі вітрові генератори, що є другими за популярністю серед перелічених вище категорії [10]. Перше місце посідає велика вітрова генерація в промислових масштабах.

Також розрізняють два типи вітряків за їх конструкцією: горизонтальні (рис. 1.1а) та вертикальні (рис. 1.1б) [11].



а



б

Рис. 1.1 а) горизонтальний вітрогенератор, б) вертикальний вітрогенератор

Горизонтальні - мають горизонтальну вісь обертання ротора та є найбільш поширеними, вертикальні, відповідно, вертикальну вісь та є менш поширені. Вертикальний тип осі ротора має на 30% нижчий ККД ніж у горизонтального. ККД класичних промислових вітроустановок сягає 30% - 35% від загальної енергії вітрового потоку.

Слід зазначити, що ККД вітрогенератора, за законом Беца, не може перевищувати 59% від загальної енергії вітрового потоку. Цей закон ґрунтується на припущенні, що якщо вся енергія вітру буде поглинута турбіною, то рух повітря за нею припиниться [12]. У такому разі повітряний потік більше не зможе проходити через турбіну. В математичній основі лежить закон збереження енергії та визначення кінетичної енергії, що приводить до висновку максимального ККД турбіни в 59,3%.

Втрати присутні при перетворенні енергії з енергії вітру в механічну, а потім в електричну [13]. Приблизно значення втрат відносно теоретичного максимуму (межі Беца) будуть наступними:

- аеродинамічне захоплення енергії лопотями - 25 - 30%;
- механічна передача - 5 %;
- електромеханічне перетворення в генераторі - 5%;
- силова електроніка - 5%;
- передача по кабелях - 2%;
- акумулювання - 10%;

В сумі отримуємо приблизний ККД вітрогенератора 57% від теоретичного максимуму. Тобто 34% від енергії вітрового потоку, що проходить крізь площину кола лопатей.

1.4 Втрати у силовій електроніці вітрогенератора

Розглянемо поширену модель вітрогенератора горизонтального типу малої потужності FT-2000 L2 [14]. З діаметром лопастей 3,2 метри, висотою щогли 10 метрів та за швидкості вітру приблизно 12 м/с він генерує 2 000 Вт електроенергії [15]. Як правило в генераторах встановлені синхронні трифазні генератори на постійних магнітах. В таких моделях вихідна частота та напруга напряму залежать від швидкості обертання валу. Саме тому отриману електроенергію потрібно додатково стабілізувати та перетворювати до стандарту мережі та для відповідних характеристик зарядного пристрою акумуляторів.

Крім того, виникає проблема відстеження оптимальної робочої точки генератора. При зростанні вихідного струму в обмотках індукується зворотне магнітне поле (ефект самоіндукції), яке протидіє магнітному полю постійних магнітів ротора [13]. Це спричиняє зниження кутової швидкості обертання ротора. Така взаємодія вимагає постійного коригування параметрів навантаження, зокрема внутрішнього опору, з метою досягнення умов, що

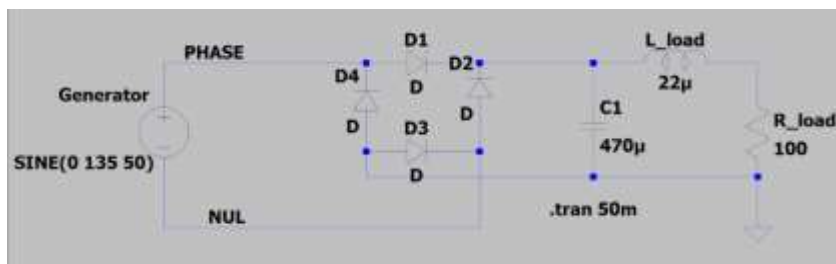
					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		16

забезпечують максимально ефективно відбирання потужності. Пристрій, що призначений для цього називається контролер відслідковування точки максимальної потужності вітрогенератора (англ. MPPT controller - Maximum power point tracking controller) [16].

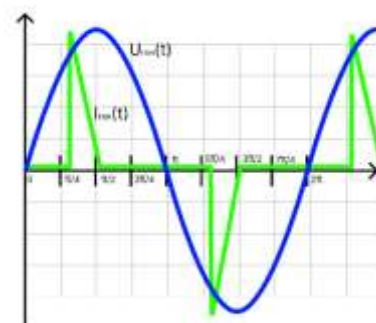
В таких контролерах відбувається декілька перетворень струму. Спершу енергія від генератора проходить через випрямляч для перетворення зі змінної напруги (AC) на постійну (DC) та за допомогою перетворювача стабілізується до 65 - 75 В. Наступним етапом є гальванічна розв'язка та підвищення напруги до робочої напруги інвертора близько 400 В. Після чого частина енергії через контролер заряду спрямовується на акумуляування, а частина через інвертор потрапляє в мережу. Всі процеси управляються вбудованим мікроконтролером, який в свою чергу регулює вихідний струм контролера відповідно до розрахованої точки відбору максимальної потужності вітрогенератора [17].

На кожному з перетворень енергія втрачається на нагрів напівпровідників та провідників. Крім того форма струму на виході генератора та на його обмотках залежить від приєданого навантаження. Оскільки всі контролери мають випрямляч, велику ємність для згладжування струму та індуктивність у вигляді обмоток імпульсного трансформатора, форма струму спотворюється. У колі з'являється реактивна потужність, що не споживається, а лише циркулює між навантаженням та генератором.

На рис. 1.2,а зображено побудовану схему в середовищі LTspice та результати моделювання. Для кращої наглядності результати були перемальовані та наведені на рис. 1.2,б.



а



б

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

Рис. 1.2 а) схема однофазного випрмляча струму з RLC навантаженням, б) результати моделювання

Струм споживається імпульсно лише на інтервалах $(\pi/4, \pi/2)$ та $(5\pi/4, 3\pi/2)$. Це зумовлено наявністю кута комутації вентилів та тим, що вентиль працює лише на інтервалі меншому за півперіод напруги на вході. Еквівалентний синусоїдний струм з таким ж середньоквадратичним значенням має набагато меншу амплітуду. Також струм має деякий зсув фаз відносно напруги, що також впливає на потужність що виділяється на генераторі.

Потужність, що споживається називається активною P , а та що є обмінною між генератором та навантаженням - реактивною Q [18]. Повна потужність S визначається з рівняння:

$$S^2 = Q^2 + P^2. \quad (1.1)$$

Співвідношення активної потужності до повної називається коефіцієнтом потужності (англ. PF – power factor) $\lambda = P/S$.

Виникнення не ідеального синусоїдного струму в обмотках генератора, сприяє виникненню нерівномірного в часі протидіючого магнітного поля. Відповідно це заважає генератору обертатись рівномірно та вийти на свої максимальні показники.

1.5 Пасивні засоби підвищення коефіцієнту потужності

Задля корекції коефіцієнту потужності λ (англ. PFC – Power Factor Correction) слід зменшити значення реактивної потужності. Це можна досягти активними та пасивними пристроями компенсації реактивної потужності [18][19].

Розглянемо пасивні пристрої. Найпоширенішими є конденсаторні батареї, що являються найпростішими та найдешевшими засобами. За допомогою великої ємності, що може змінюватись, встановленої паралельно, вони створюють випереджальний струм, що частково або повністю компенсує

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата		18

споживану реактивну потужність індуктивного характеру, тим самим знижуючи навантаження на генератор[20]. Такі системи часто використовуються в мережах із постійними або слабо змінними умовами навантаження. Значними недоліками таких установок є висока ймовірність імпульсів струмів при комутації ємностей, відсутність плавної та постійної компенсації [18]. Також конденсаторні батареї не розраховані на низьковольтні мережі, що є критичним недоліком в рамках вітрогенерації.

LC-фільтри складаються з послідовного або паралельного з'єднання індуктивностей і ємностей, налаштованих на певну частоту. Вони ефективно поглинають гармоніки вищих порядків, які виникають через ШІМ-перетворювачі, і водночас частково компенсують реактивну потужність. Недоліком є їх чутливість до змін у мережі, що може призводити до резонансних явищ.

Шунтові дроселі, аналогічно до конденсаторних батарей компенсують надлишкову реактивну потужність ємнісного характеру. Простий засіб в реалізації, проте малоефективний при динамічних змінах в навантаженні та мережі.

1.6 Активні засоби корекції коефіцієнту потужності

Активні пристрої для корекції коефіцієнту потужності використовуються в системах де потрібно швидко адаптуватись під нові умови. Такі пристрої поділяють на такі типи [18]:

- синхронні компенсатори;
- тиристорні регулятори напруги;
- помножувачі ємнісного опору;
- керовані реактори;
- конденсаторні батареї з тиристорною комутацією чи з переключеннями всередині схеми;
- вентильні джерела з частотним регулюванням;

									Арк
									19
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата	ДП ДЕ11 03.000.ПЗ				

- вентильні перетворювачі зі штучною комутацією;
- вентильні перетворювачі з природною комутацією;
- активні фільтри;
- послідовні фільтро-компенсаційні перетворювачі;
- паралельні фільтро-компенсаційні перетворювачі.

Синхронний компенсатор — це синхронний електродвигун, що працює в холостому режимі, генеруючи реактивну потужність без створення активної. Його перевагою є можливість плавного регулювання коефіцієнта потужності та стабілізації напруги в мережі. Проте це складна і дорога система, яка застосовується переважно на підстанціях високої напруги.

Тиристорні регулятори напруги використовуються для плавного регулювання напруги на навантаженні шляхом керованого відкриття тиристорів у фазі. Такі пристрої забезпечують швидке реагування на зміну режиму споживання, однак викликають сильні електромагнітні завади через генерацію гармонік. До переваг належить простота реалізації та низька вартість, а недоліками є високий рівень спотворень та складність у фільтрації.

Помножувачі ємнісного опору реалізуються за допомогою спеціалізованих схем, які імітують високе ємнісне навантаження, збільшуючи реактивну ємність без значного фізичного обсягу. Їхньою перевагою є компактність і можливість використання у високочастотних системах. Проте такі пристрої мають обмежену потужність та чутливість до стабільності вхідної напруги.

Керовані реактори (керовані індуктивності) — це дроселі зі змінною індуктивністю, яка регулюється подачею струму на магнітне осердя або за допомогою тиристорної комутації. Вони дозволяють гнучко змінювати індуктивну реактивність у системі, забезпечуючи баланс реактивної потужності. До недоліків належать великі габарити, вагомі втрати на нагрів і складність у керуванні при швидких змінах навантаження.

Конденсаторні батареї з тиристорною комутацією дозволяють швидко підключати чи відключати окремі секції конденсаторів залежно від

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>20</i>

навантаження. Це забезпечує ступінчасту, але швидко компенсацію реактивної потужності. Основними перевагами є висока надійність і простота в реалізації, однак ступінчастий характер регулювання не завжди забезпечує точну компенсацію.

Вентильні джерела з частотним регулюванням дозволяють гнучко адаптуватися до змінних режимів споживання, забезпечуючи і компенсацію реактивної потужності, і стабілізацію напруги. Їх використання дозволяє також зменшити пускові струми та втрати у системах електроприводів. Водночас вони складні у налаштуванні та потребують потужного керування з боку мікропроцесорних систем.

Вентильні перетворювачі зі штучною комутацією побудовані на основі IGBT або MOSFET ключів, які перемикаються за сигналами керування незалежно від струму в колі. Порівнюючи значення напруги на конденсаторі та в мережі вентилі перемикаються та комутують накопичувач великої індуктивності. Таким чином регулюється фаза першої гармоніки, що покращує λ .

Вентильні перетворювачі з природною комутацією працюють на базі SCR (тиристорів), які комутуються в моменти природного переходу струму через нуль. Їх конструкція простіша та дешевша, однак це обмежує швидкодію та точність регулювання. Такий тип пристроїв менш ефективний при компенсації швидкозмінних реактивних складових.

Всі перераховані пристрої PFC компенсують реактивну потужність тільки по основній гармоніці, проте додають реактивної потужності в інші вищі гармоніки [18]. Це означає що такі фільтри не зможуть підвищити енергетичні характеристики генератора.

Активні фільтри є найбільш ефективним рішенням для компенсації як реактивної потужності, так і гармонік в електромережі. Вони аналізують форму струму навантаження в реальному часі й створюють відповідну протидіючу складову, формуючи синусоїдальний струм на вході. Основними перевагами є висока точність, здатність працювати з будь-яким видом спотворення, проте

									Арк
									21
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата	ДП ДЕ11 03.000.ПЗ				

вони є громіздкими та для їх налаштування на різні типи навантаження потрібно змінювати внутрішню структуру фільтра.

Задля забезпечення широкого спектру та гнучкості використання застосовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). За допомогою ШІМ можна формувати будь-яку форму сигналу. Таким чином працюють більшість PFC в сучасних блоках живлення [21]. Принцип роботи таких фільтрів базується на еквівалентних схемах імпульсних перетворювачів струму або напруги. Популярною назвою таких коректорів коефіцієнту потужності є фільтро-компенсаційний перетворювач (ФКП) [18]. Здебільшого саме такі системи вбудовуються в контролери вітрогенераторів.

ФКП, що підключаються в розріз мережі, або вбудовуються в навантаження називають послідовними фільтро-компенсаційними перетворювачами (англ. Serial Active Power Filter). Характерною ознакою даних ФКП являється формування напруги з цілю компенсації на вході навантаження. Розглянемо схему одного з таких активних фільтрів (рис. 1.3)[21].

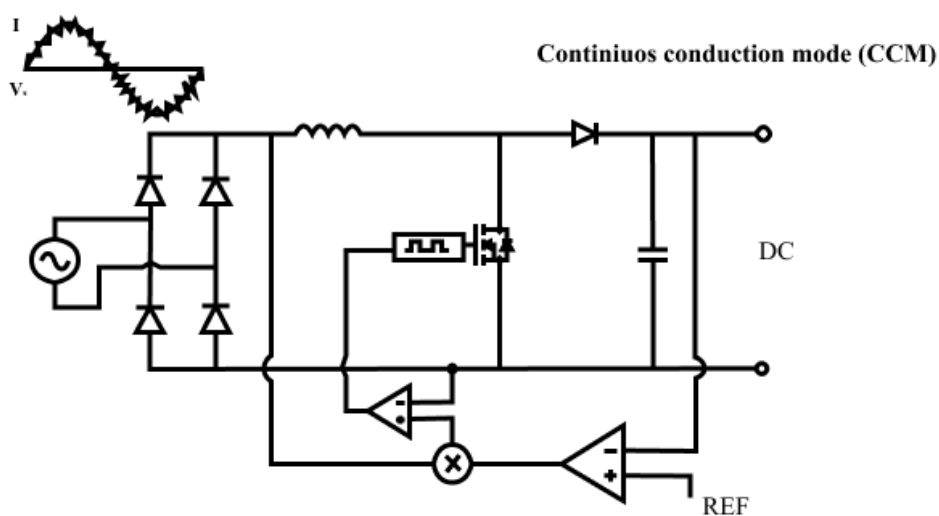


Рис. 1.3. Схема активного фільтра

ФКП даного типу вбудований у випрямляч, між вентильним мостом та згладжуючою ємністю. Мосфетний ключ, індуктивність та діод утворюють підвищуючий імпульсний перетворювач, що керується ШІМ. За допомогою зворотного зв'язку та логіки, вираховується коефіцієнт заповнення ШІМ. Це дозволяє генерувати напругу заданої форми. Дана схема являється

підвищуючим імпульсним перетворювачем та має різні способи формування вихідного сигналу. На розглянутому Рис. 1.3 метод, що використовується для формування вихідної синусоїди струму називається режим безперервної провідності (англ. Continuous Conduction mode (CCM)), також існує інший метод під назвою критичний режим критичної провідності (англ. Critical conduction mode (CRM)) [21].

Такий спосіб корекції є не найефективнішим для компенсації реактивної складової напруги. Проте головним недоліком послідовних ФКП є факт пропускання всього струму навантаження через ключові елементи схеми, а отже це обмежує максимальний струм навантаження. Через котушку індуктивності проходить весь струм навантаження, тому номінальний струм котушки має відповідати номінальному струму навантаження. Як наслідок зі збільшенням номінальної потужності мережі суттєво збільшуються габарити послідовного ФКП.

Також існують паралельні ФКП (shunt Active Power Filter), які вирішують проблему послідовних, підключаючись паралельно до мережі перед навантаженням.

1.7 ФКП паралельного типу

Фільтро-компенсуючий перетворювач (ФКП) паралельного типу компенсує реактивну потужність за допомогою струмом компенсатора за Законом Кірхгофа для струмів. На рис. 1.4 зображено еквівалентну схему вітрогенератора з навантаженням у вигляді випрямляча та активно-індуктивного навантаження та паралельно підключеним компенсатором [22].

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		23

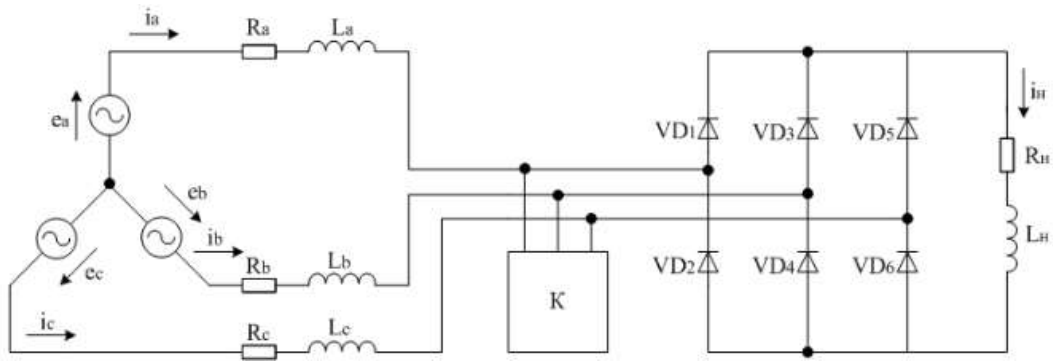


Рис. 1.4 Схема підключення компенсатора до еквівалентної схеми мережі

Цей тип ФКП є одним з найбільш універсальних серед активних засобів. Основними недоліками є вартість і необхідність складного високочастотного керування з попередньою фільтрацією вхідного сигналу.

Як вже було зазначено ФКП підключається паралельно до навантаження та задає компенсуючий струм. Таким чином формується вже скомпенсований струм генератора, що має знижений коефіцієнт потужності. Схема складається з трьох складових: накопичувача, зарядного пристрою (ЗП) та інвертора (І) [18]. Схематично паралельний ФКП зображено на рис. 1.5, де ЗП – зарядний пристрій, Н – накопичувач, І – інвертор.

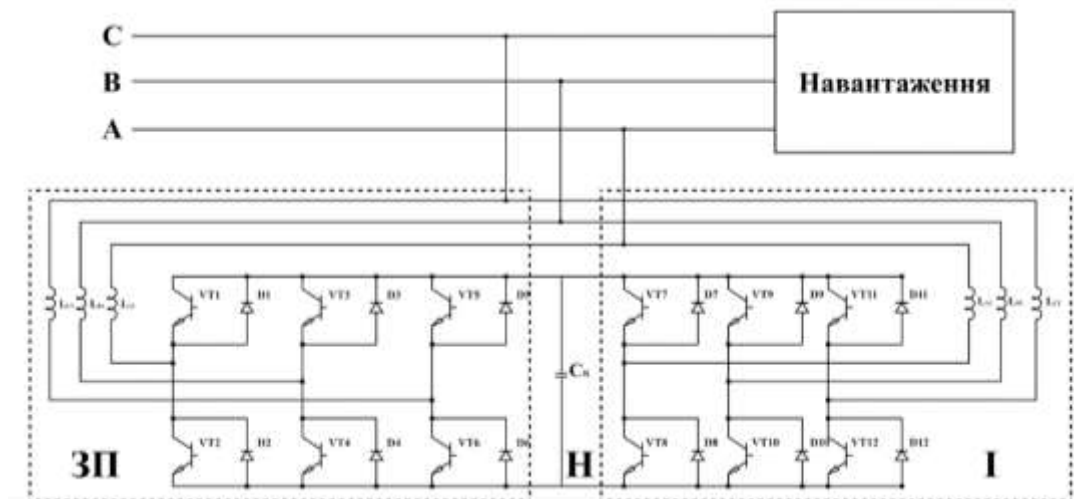


Рис. 1.5 Складові ФКП

Така схема є складною та використовує багато складових. Її можна спростити до схеми де ЗП та І об'єднуються в один блок К – компенсатор, який являється компенсаційним перетворювачем рис. 1.6 [18].

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

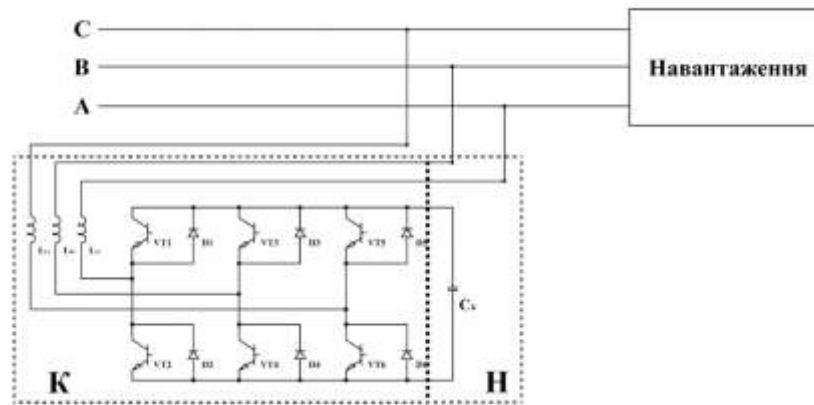


Рис. 1.6 Об'єднанні блок ЗП та І в блок К компенсатора ФКП

Накопичувач – це ємність, що накопичує або віддає енергію у відповідних режимах роботи ФКП, весь інший час накопичувач зберігає енергію. Компенсатор складається з 6 керованих ключів розміщених за мостовою схемою, до кожного ключа під'єднаний шунтуючий вентиль, які разом утворюють трифазний мостовий випрямляч. За допомогою керованих ключів, що позначені на рис. 1.6 як VT1 – VT6, обирається режим роботи ФКП відносно кожної фази. За допомогою ШІМ сигналу, що подається на відповідні ключі, регулюється струм споживання накопичувача або інвертування в мережу з накопичувача.

Розглянемо часові діаграми струмів в мережі рис. 1.7.

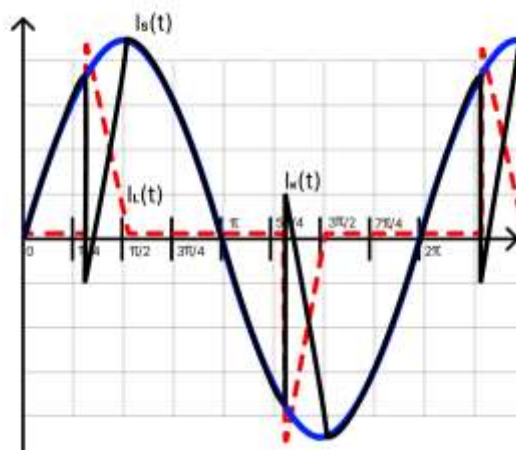


Рис. 1.7 Часова діаграма фазного струму мережі з ФКП

На діаграмі синім кольором зображено фазний струм еквівалентного генератора, червоним струм навантаження та струм компенсатора чорним

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата		25

кольором. Форма струму генератора, має відповідати формі струму напруги, тобто дорівнювати синусоїді. Щоб досягти цього, струм компенсатора $I_k(t)$ генерується таким, щоб при додаванні струмів компенсатора та навантаження отримати синусоїду [2]. Тобто:

$$I_S(t) = I_K(t) + I_L(t), \quad (1.2)$$

де I_S – струм джерела (генератора), I_K – струм компенсатора, I_L – струм навантаження. Відповідно існують такі режими роботи компенсатора:

- споживання за позитивної напівхвилі $I_S(t)$;
- інвертування за позитивної напівхвилі $I_S(t)$;
- споживання за негативної напівхвилі $I_S(t)$;
- інвертування за негативної напівхвилі $I_S(t)$.

Для споживання потрібно комутувати такі ключі, щоб утворився підвищуючий перетворювач, що живиться від мережі та заряджає накопичувач, а для інвертування комутується конфігурація понижуючого перетворювача, який живиться від накопичувача та передає енергію в мережу.

Фільтро-компенсаційний перетворювач (ФКП) паралельного типу потребує складної та високопродуктивної системи керування, оскільки має одночасно вирішувати кілька завдань у режимі реального часу. Зокрема, необхідно динамічно розраховувати коефіцієнт заповнення широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), визначати оптимальну конфігурацію відкриття силових ключів інвертора та здійснювати безперервну обробку сигналів зворотного зв'язку. Основу такої системи складає мікропроцесор або цифровий сигнальний контролер (DSP), який здійснює аналіз навантажувального струму з високою точністю.

Контролер у реальному часі визначає гармонічні складові та реактивну компоненту струму навантаження за допомогою швидкого перетворення Фур'є або інших алгоритмів спектрального аналізу. Після цього розраховується компенсуючий струм, що має протилежну фазу до небажаних складових струму споживача. Цей струм генерується інвертором і вводиться в точку підключення навантаження до мережі. У результаті такої компенсації досягається зменшення

									Арк
									26
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата	ДП ДЕ11 03.000.ПЗ				

повної гармонічної спотвореності (ПГС) та зсуву фаз, а сумарний струм, який надходить з мережі живлення, наближається за формою до ідеального синусоїдального струму з активним характером навантаження. Такий підхід значно підвищує коефіцієнт потужності та ефективність використання енергії.

Для реалізації ФКП найчастіше застосовуються інвертори з ШІМ-регулюванням, мікроконтролерне керування, а також високошвидкісні датчики струму. Алгоритми керування, такі як метод миттєвої потужності (p-q теорія) або метод синхронного виявлення, забезпечують точне й динамічне формування компенсуючого струму.

Перевагою паралельного підключення є те, що ФКП не бере участі у передачі основної активної потужності до навантаження, а лише компенсує небажані компоненти, завдяки чому можлива робота при відносно невисокій власній потужності. Такий підхід дозволяє ефективно зменшити втрати енергії, підвищити коефіцієнт потужності та зменшити електромагнітні завади, що є особливо актуальним для систем з вітрогенераторами, які часто мають інверторне з'єднання з мережею.

Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено огляд сучасного стану вітроенергетики у світі та в Україні, визначено ключові технічні особливості роботи вітрогенераторів, зокрема їх класифікацію та енергетичну ефективність. Особливу увагу приділено аналізу втрат у силовій електроніці, які супроводжують перетворення енергії в системах малої вітрогенерації. Розглянуто методи підвищення коефіцієнта потужності: як традиційні пасивні засоби, так і сучасні активні підходи, включно з типами фільтрів і перетворювачів.

На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш доцільним рішенням для компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонік у системах з малопотужними трифазними вітрогенераторами є використання

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		27

фільтро-компенсаційного перетворювача паралельного типу. Такий підхід дозволяє адаптивно реагувати на зміну параметрів навантаження, зменшити енергетичні втрати та забезпечити високу якість електроенергії.

Отримані результати є теоретичним підґрунтям для подальших розрахунків та моделювання роботи системи паралельного фільтро-компенсаційного перетворювача, які розглядатимуться у наступних розділах.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>28</i>

2. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РОБОТИ ТРИФАЗНОГО ФІЛЬТРО-КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Технічні параметри системи вітрогенератора

Опираючись на досвід користувачів та поширеність було обрано вітрогенератор FT-2000 L2 з наступними характеристиками табл. 2.1 [14, 15].

Таблиця 2.1.

Основні характеристики вітрогенератора

Номінальна потужність, P_N	2000 Вт
Максимальна потужність, P_{max}	3000 Вт
Вихідна номінальна напруга генератора, U_N	96 В
Максимальний струм генератора, I_{max}	32 А
Мінімальна швидкість вітру, v_{min}	2,5 м/с
Номінальна швидкість вітру, v	10 м/с
Максимальна швидкість вітру, v_{max}	45 м/с
Діаметр вітроколеса, D	3,2 м

Обмотки генератора з'єднані за схемою зірка (Y), отже фазна напруга в $\sqrt{3}$ разів менше за лінійну. Частота в мережі коливатиметься відповідно до швидкості вітру. Розрахуємо мінімальну f_{min} , номінальну f_N та максимальну f_{max} частоти роботи вітрогенератора. Частота обертання ротора визначається за формулою:

$$N_{rpm} = \frac{60 \cdot v \cdot TSR}{\pi \cdot D}, \quad (2.1)$$

де v – швидкість потоку повітря, TSR – коефіцієнт швидкості обертання вітроколеса (для трьохлопатевих турбін оптимальне значення 7), D – діаметр вітроколеса.

З результатів багатократних експериментів джерела [15], що зображені на табл. 2.2 можна визначити залежність частоти обертання ротора N_{rpm} до робочої частоти генератора f_g .

Таблиця 2.2

Експериментальні виміри характеристик вітрогенератора FT-2000 L2

RPM (Об/хв)	Робоча частота генератора, f (Гц)	Вихідна потужність, P , (Вт)
150	15	299
200	20	548
250	25	854
300	30	1190
350	35	1627
400	40	2037
450	45	2514
500	50	3035

Прослідковується лінійна залежність. Відповідний коефіцієнт розраховується наступним чином:

$$\frac{N_{rpm}}{f} = \frac{400}{40} = 10. \quad (2.2)$$

Отже частота роботи вітрогенератора розраховуватиметься за формулою:

$$f = 6 \cdot \frac{v \cdot TSR}{\pi \cdot D}. \quad (2.3)$$

Звідси дізнаємось відповідні частоти, підставляючи значення v_{min} , v , v_{max} в формулу (2.2). f_{min} , f_N , f_{max} дорівнюють відповідно 10, 42, 188 Гц. Ці значення відповідають експериментальним даним відповідно до номінальної потужності.

Розрахуємо амплітудні значення напруги на виході генератора, U_m за формулою:

$$U_m = U_N \cdot \sqrt{2} = 135.76 \approx 136 [B]. \quad (2.4)$$

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
						30
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата		

Розрахуємо номінальну силу струму генератора, I_N за формулою:

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{2000}{96} \approx 20.8 \text{ [A]}. \quad (2.5)$$

В якості навантаження використовується трифазний діодний випрямляч за мостовою схемою та активно-ємнісне навантаження схематично зображено на рис. 2.1.

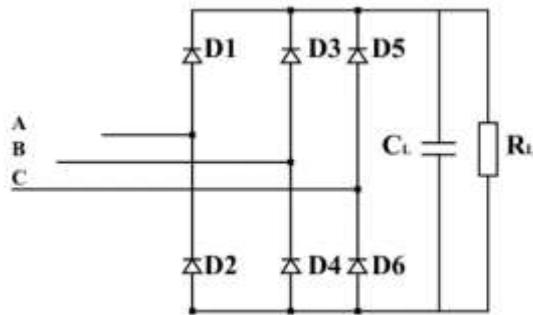


Рис. 2.1. Еквівалентна схема навантаження

Нехай в номінали навантаження будуть наступними: $R_L = 100 \text{ [Ом]}$ та $C_L = 50 \text{ [мкФ]}$.

2.2 Принцип дії паралельного ФКП

Загальний алгоритм роботи ФКП полягає у вимірюванні струму навантаження та напруги в точці підключення, обчисленні спотвореної або реактивної складової струму і формуванні компенсуючого струму, який генерується компенсатором. Задачею системи є синтез такої форми струму, яка у сумі з навантаженням забезпечує практично синусоїдальний загальний струм, що споживається з мережі, і перебуває в фазі з напругою.

Типова структура паралельного фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП) включає в себе кілька основних функціональних блоків рис. 2.2. Функціональна схема в повній мірі відображена в Додатку А.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата		31

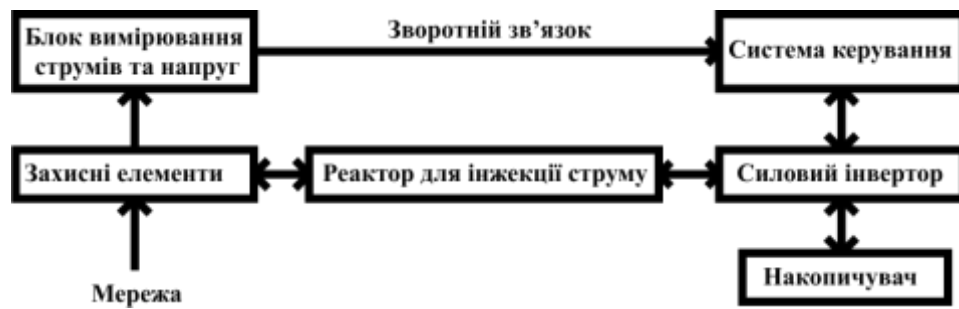


Рис. 2.2. Зображення функціональної схеми

Накопичувач призначений для зберігання запасу енергії. При споживанні струму з мережі енергія накопичується, а при інвертуванні передається в мережу. Еквівалентною схемою накопичувача є конденсатор великої ємності, що дозволяє компенсатору працювати з достатнім запасом енергії для компенсації реактивної складової струму.

Основною частиною ФКП є компенсатор. Він складається з мостової схеми ключів (наприклад IGBT або MOSFET транзисторів), що керуються за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Таким чином можна змінювати режими роботи та працювати як інвертор або зарядний пристрій. Інвертор перетворює постійну однополярний постійний струм з ємнісного накопичувача у змінний струм, синхронізований за фазою і формою з компенсуючим струмом, що необхідний для мережі. Зарядний пристрій передає енергію від мережі до накопичувача, перетворюючи змінний струм в постійний.

На виході компенсатора встановлюється реактор для інжекції струму. Це індуктивність, яка обмежує швидкість зміни струму (di/dt) та зменшує високочастотні імпульсні компоненти, що виникають через роботу ШІМ. Дросель також слугує як елемент для інжекції компенсуючого струму в точку підключення навантаження.

До структури також входять ланцюги захисту від перенапруги та короткого замикання: варистори, RC-демпфери, плавкі вставки або автоматичні вимикачі. Вони захищають компенсатор від стрибків напруги та аварійних режимів у мережі.

Блок вимірювання струмів та напруг містить відповідні датчики. Ці елементи є необхідними для точної роботи зворотного зв'язку. Зазвичай

									Арк
									32
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата	<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>				

застосовуються шунти або трансформатори струму, а також подільники напруги. Отримані сигнали передаються в систему керування, де обробляються АЦП та цифровими фільтрами.

Система керування включає мікроконтролер або цифровий сигнальний процесор (DSP) та реалізує алгоритми фільтрації гармонік і компенсації реактивної потужності. Основні функції: обчислення гармонічної складової струму, генерація еталонного сигналу, обчислення компенсуючого струму, формування ШІМ-сигналів для ключів. Це найскладніший в реалізації блок.

Для комутації з керованим ШІМ сигналом найкраще підійдуть польові транзистори, а саме МОН з n-канальним затвором (N-MOSFET). Це найкращий варіант з огляду на діапазон його робочих значень. Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT) використовується при напругах вище 500 В, а звичайні біполярні транзистори мають занадто малі межі струму колектор – емітер.

2.3 Режими роботи компенсатора

Розглянемо схему силової частини ФКП рис. 2.3.

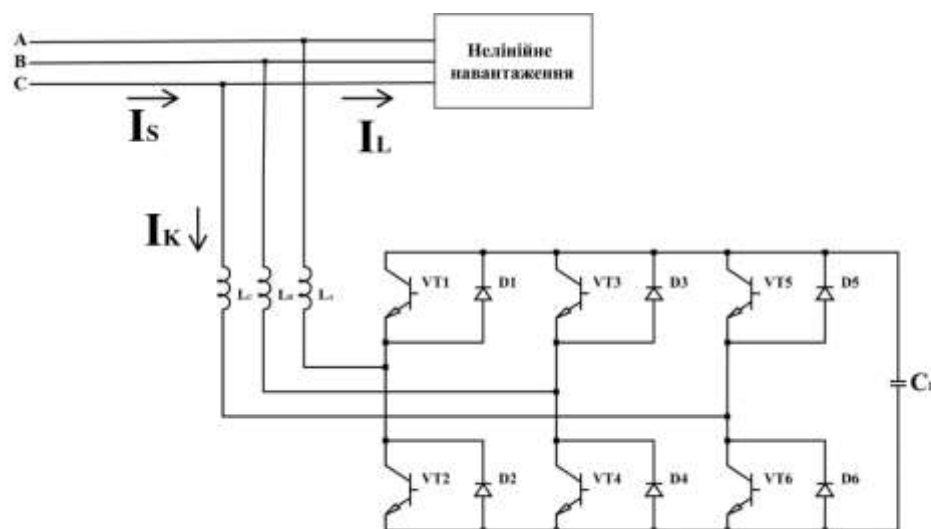


Рис. 2.3. Схематичне зображення будови силової частини ФКП

На схемі позначені основні струми, що протікають в мережі. Для детального огляду принципу роботи силової частини ФКП розглядаються

						<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата			33

часові діаграми струмів та напруг рис. 2.4, де U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – лінійні напруги, I_{SA} , I_{SB} , I_{SC} – струми фаз генератора, I_{LA} , I_{LB} , I_{LC} – фазні струми навантаження, I_{KA} , I_{KB} , I_{KC} – фазні струми компенсатора.

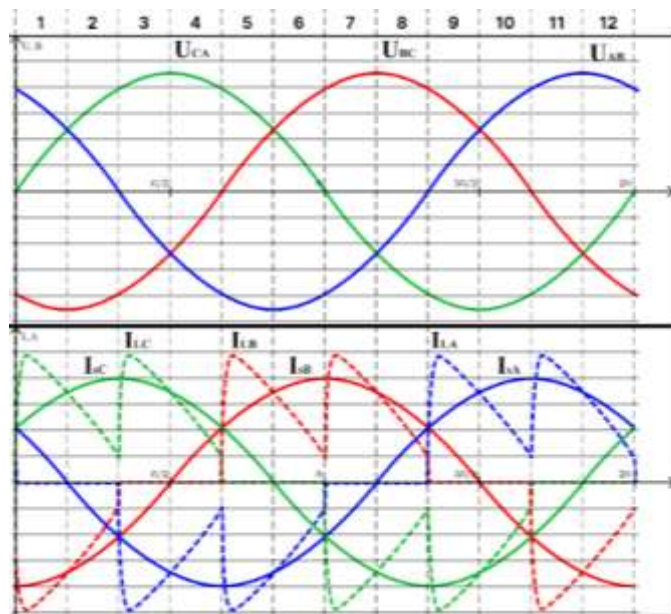


Рис. 2.4 Часові діаграми струмів та напруг

Струм генератора має синусоїдну форму, а його діюча сила струму дорівнює діючій силі струму навантаження. Для досягнення такого результату, компенсуючий струм має бути рівним різниці струмів генератора та навантаження.

$$I_K(t) = I_S(t) - I_L(t). \quad (2.6)$$

Амплітуда струму генератора визначається за формулою:

$$I_M = I_L \cdot \sqrt{2}, \quad (2.7)$$

де I_L - діючий фазний струм навантаження.

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_L(t)^2 dt}, \quad (2.8)$$

де T - період мережі $1/f_N = 0.024$ [с]. Після проведення розрахунків отримано наступні значення: $I_L = 1,2$ [A], $I_M = 1,7$ [A].

Тоді миттєвий струм генератора $I_S(t)$:

$$I_S(t) = I_M \sin(\omega t + \varphi) = 1.7 \cdot \sin\left(84\pi \cdot t - \frac{\pi}{6}\right). \quad (2.9)$$

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

інвертування, $I_{ка} < 0$ - режим споживання. Тобто загалом можна виокремити 4 РРК:

- споживання при позитивній півхвилі (ПС);
- інвертування при позитивній півхвилі (ПІ);
- споживання при негативній півхвилі (НС);
- інвертування при негативній півхвилі (НІ).

Порядок РРК для кожної з фаз вказано в табл. 2.3:

Таблиця 2.3

Порядок режимів роботи компенсатора

Інтервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
А	ПС	НС	НІ	НС	НІ	НС	НС	ПС	ПІ	ПС	ПІ	ПС
В	НІ	НС	НС	ПС	ПІ	ПС	ПІ	ПС	ПС	НС	НІ	НС
С	ПІ	ПС	ПІ	ПС	ПС	НС	НІ	НС	НІ	НС	НС	ПС

2.4 Аналіз роботи транзисторів у кожному інтервалі

Кожному з РРК відповідає схема увімкнення ключів компенсатора рис.

2.7.

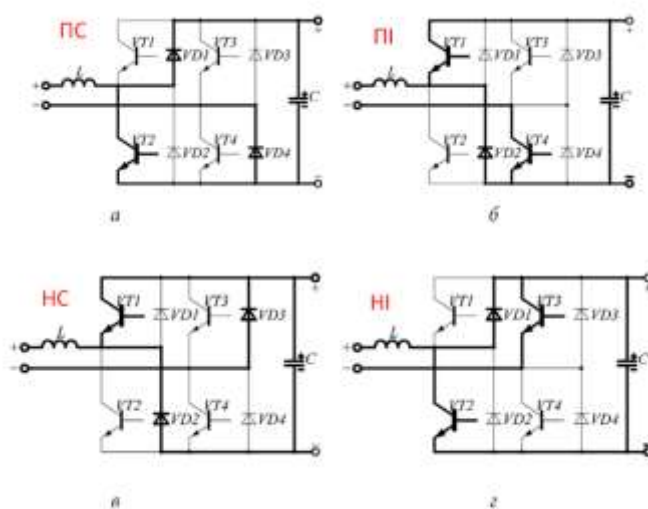


Рис. 2.7. Схеми увімкнення для РРК

Для схеми ПС ключі VT1, VT3 та VT4 - розімкнуті. Ключ VT2 - керується ШІМ та разом з індуктивністю L та діодом VD1 утворює імпульсний підвищуючий перетворювач. Енергія споживається з мережі та передається в накопичувач.

Для схеми ПІ ключі VT3 та VT2 - розімкнуті, ключ VT4 - замкнений, а VT1 керується ШІМ. Коло з L, VT1, VT4 та VD2 утворюють імпульсний понижуючий перетворювач. Енергія споживається з накопичувача та передається в мережу.

Схеми НС та НІ працюють за негативної півхвилі, а отже потенціал на вході "+" є нижчим за потенціал на вході в точці "-". Отже схеми працюватимуть за такою ж логікою, що і при позитивній півхвилі, проте напрям струму буде інвертований. Тобто для НС VT1 - керується ШІМ та разом з VD2 та L утворює підвищуючий перетворювач. Для НІ VT2 керується ШІМ, VT 3 - замкнений. Відповідно утворюється понижуючий перетворювач. При НС, енергія, так само, передається з мережі в накопичувач, а при НІ навпаки.

Розглянемо інтервальні схеми увімкнення ключів для всіх фаз. Для першого інтервалу рис. 2.8.

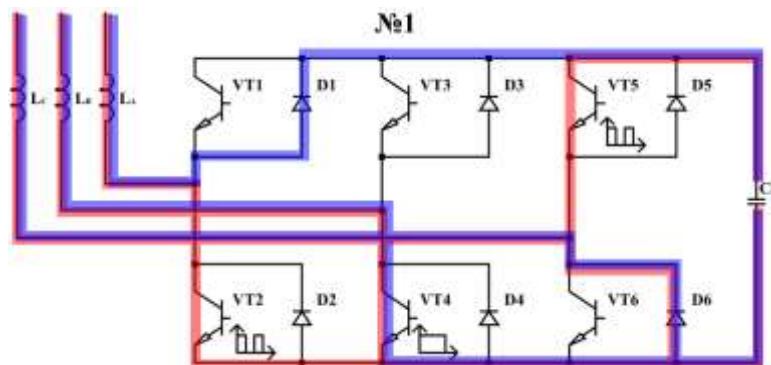


Рис. 2.8 Інтервальна схема для інтервалу №1

Червоним кольором позначено коло протікання струму для моменту коли ключі, що керуються ШІМ замкнені, синім - відповідно, розімкнені. З аналізу рис. 2.4 на цьому інтервалі потенціал фази А, відносно інших є найбільшим, а найменший потенціал на фазі В. РПК для фаз А, В, С відповідно ПС, НІ, ПІ. Фаза В та С компенсують одна одну та їм відповідає одна схема. VT5 - керується ШІМ, VT4 - замкнений та разом з діодом D6, індуктивностями L_c та

									Арк
									37
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата					

L_B утворюють понижуючий перетворювач, що передає енергію з накопичувача в мережу. З рис. 2.5 спостерігається наступна залежність, що закономірна для всього періоду T :

$$-I_{KC} = I_{KA} + I_{KB} \quad (2.10)$$

Звідси слідує, що струм з фази А в першому інтервалі протікатиме через D_6 на фазу С. Відповідно VT_2 - керується ШІМ, та разом з L_A , D_1 та D_6 утворює підвищуючий перетворювач.

Таким чином, розрахувавши всі інтервали отримуємо послідовність роботи всіх ключів (рис. 2.9).

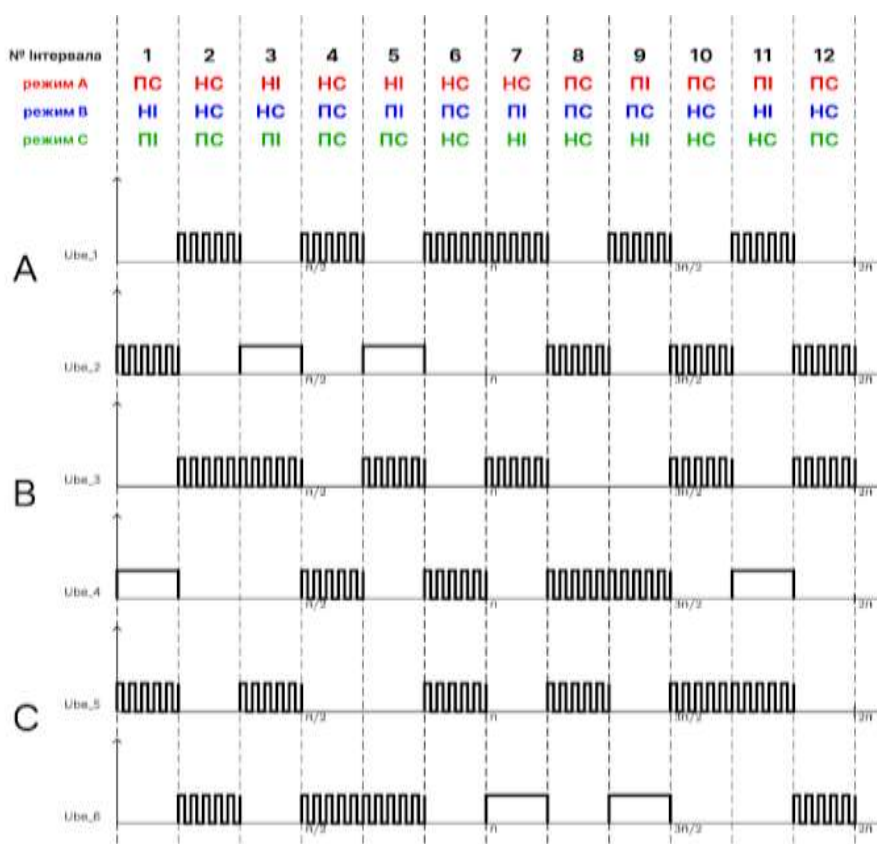


Рис. 2.9. Інтервальна послідовність роботи ключів

Всі часові діаграми, інтервальні схеми та таблиці з РРК наведені в Додатку Б.

2.5 Аналіз і розрахунок струмів та номіналів у силових елементах

Для забезпечення ефективною та надійною роботи трифазного ФКП вітрогенератора, надзвичайно важливим є точний розрахунок струмів та напруг у його ключових силових колах та елементах. Розрахунок проведено за вхідними даними визначеними в підрозділі 2.1 відповідно для обраного навантаження та характеристик вітрогенератора. Так як розрахунок є однаковим для всіх фаз, розглянемо фазу А.

Максимальний струм індуктивності L - це струм компенсатора $I_{ка}$. За максимальних значень різниці струму генератора та струму навантаження струм компенсатора досягає пікових значень, а саме в моменти часу $\pi/3$ та $4\pi/3$.

$$I_{K_{max}} \approx \pm 1.4 [A]. \quad (2.11)$$

Максимальний струм, що протікає через діод D1 або D2 відповідає значенням $I_{K_{max}}$. За позитивної півхвилі найбільший струм протікає через діод D1, що з'єднує фазу з позитивним полюсом накопичувача. За негативної півхвилі, найбільший струм протікає через діод D2, що з'єднує негативний полюс компенсатора з фазою. За таким ж алгоритмом визначаються максимальні струми, протікаючі через керовані ключі VT1 та VT2. Максимальні струми керованих ключів та вентилів протікають в режимах споживання компенсатором струму з відповідної фази (ПС та НС).

Напруга на конденсаторі C_k не є постійною, а пульсує в деякому діапазоні напруг. Це зумовлено тим, що енергія накопичувача в різні моменти часу або додається або віднімається. Середнє значення U_{DC} буде приблизно дорівнювати:
 $U_{DC} \approx U_m = 136 [V]$.

Ефективний вибір ключів для автономних інверторів напруги передбачає врахування коефіцієнта запасу за напругою. Так, максимальна робоча напруга колектор-емітер цих компонентів має щонайменше в 1.5 рази перевищувати пікове значення напруги в ланці постійного струму [23]. Це критичний фактор для забезпечення безперебійної функціональності та запобігання перевантаженням.

$$U_{VTce} = 1.5 \cdot U_{DC_{max}}, \quad (2.12)$$

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата		39

де U_{DCmax} - максимальна напруга на конденсаторі за максимальних обертів ротора сягатиме 155 В. Конденсатори, що встановлюватимуться матимуть максимальну напругу 250 В за загальноприйнятою практикою. Отже $U_{VTCe} = 375$ [В].

Розрахунок ємності накопичувача проводиться за формулою:

$$C_K = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0}, \quad (2.13)$$

де k_p - коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги,(прийнято обирати приближне значення до 0.05), m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі живлення, R_0 - еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму [23].

Значення постійного струму розраховуються наступним чином:

$$I_{DC} = \frac{1,2 \cdot P_N}{U_{DC} \eta}, \quad (2.14)$$

де η - коефіцієнт корисної дії інвертора (0,95).

Отримані значення $I_{DC} = 18,6$ [А]. Розрахуємо еквівалентний опір R_0 та ємність конденсатора C_K при $k_p = 0,005$.

$$R_0 = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}. \quad (2.15)$$

Отже $R_0 = 7.3$ [Ом] звідси $C_K = 0,035$ [Ф]

Мінімальна величина індуктивності згладжувального дроселя визначається з виразу[24]:

$$L_{kp} = \frac{U \cdot \gamma}{2 \cdot I_k f} + \frac{R_{II} \gamma}{f}, \quad (2.16)$$

де L_{kp} – мінімальна величина індуктивності дроселя, U – дійсне значення напруги мереж, γ – максимальний коефіцієнт заповнення, f – робоча частота генератора, R_{II} – опір еквівалентної схеми (рис. 2.10) [24].

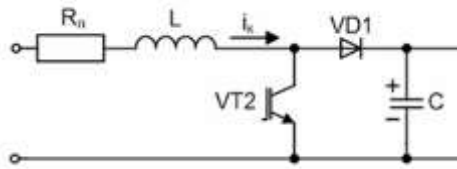


Рис. 2.10 еквівалентна схема споживання за умови неперервності струму

R_{II} визначається з огляду на напругу та максимальний струм мережі. $R_{II} \approx 5$ [Ом], $U = 96$ [В], максимальний коефіцієнт $\gamma \approx 0,95$, $f = 42$ [Гц]. Отже мінімальна індуктивність $L_{кр} \approx 0,05$ [Гн].

Максимальний струм стік-витік МОН транзисторів відповідає максимальному струму компенсатора.

Повна схема електрична принципова силової частини з датчиками наведена в Додатку В з переліком елементів, що наведений в Додатку Г.

Висновки до другого розділу

У даному розділі було здійснено теоретичне обґрунтування роботи трифазного фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП), розробленого для покращення якості електроенергії, що генерується вітроустановкою. На основі попередньо визначених параметрів генераторної установки проведено глибокий аналіз принципу дії паралельного ФКП, зокрема описано його структуру, функціональні блоки та режими роботи. Розглянуто динаміку перемикання транзисторних ключів у кожному інтервалі синусоїдального сигналу та особливості генерації компенсуючого струму в реальному часі.

Розраховано граничні значення струмів і напруг, які визначають допустимі навантаження елементів, а також здійснено вибір їх номіналів відповідно до вимог надійності, енергетичної ефективності та теплової стійкості. Встановлено, що максимальна напруга на накопичувальному конденсаторі не перевищує 155 В, а необхідна напруга пробною силових ключів має становити не менше 375 В із врахуванням коефіцієнта запасу.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата		41

Окрім того, розраховано еквівалентний опір навантаження постійного струму та ємність конденсатора накопичувача, яка становить 0,035 Ф, що відповідає заданому рівню пульсацій напруги та забезпечує стабільність роботи інвертора. Отримані результати підтверджують працездатність концепції компенсатора для інтеграції у вітроенергетичну систему та створюють передумови для побудови її динамічної моделі в середовищі комп'ютерного моделювання.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		42

3. ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВІТРОГЕНЕРАТОРА

3.1 Вибір середовища моделювання та побудова моделі мережі вітрогенератора

Моделювання є критичним етапом у процесі дослідження функціонування фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП) до його практичної реалізації. Саме шляхом чисельного аналізу вдається перевірити правильність прийнятих технічних рішень, дослідити перехідні процеси, визначити реакцію системи на змінні параметри навантаження, а також проаналізувати ступінь компенсації реактивної потужності та ефективність фільтрації гармонік.

Для реалізації моделі було обрано програмне середовище Matlab Simulink, яке є промисловим стандартом у сфері електроніки та систем автоматичного керування. Основою моделі стала спеціалізована бібліотека Simscape – Electrical – Specialized Power Systems, що містить набір елементів для моделювання силових електронних пристроїв, електричних мереж, джерел енергії, систем керування та засобів вимірювання. Застосування цієї бібліотеки дозволяє максимально точно моделювати складні нелінійні процеси у силовій частині системи, включаючи комутацію ключів, електромагнітні перехідні явища та вплив елементів навантаження.

Першим блоком будується генератор. Еквівалентною схемою для обмотки є послідовне з'єднання джерела напруги синусоїдної форми, резистору та індуктивності. Обмотки з'єднуються між собою за схемою зірки. Це з'єднання має кілька важливих технічних переваг, які особливо актуальні для моделювання та аналізу:

- фазна напруга в $\sqrt{3}$ разів менша за лінійну, що дозволяє зменшити електричне навантаження на ізоляцію обмоток та силові електронні елементи (діоди, транзистори, конденсатори), що моделюються в еквівалентній схемі.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата		43

- з'єднання обмоток за схемою зірка забезпечує стабільнішу роботу випрямляча, особливо при неповному навантаженні або нерівномірному струмі по фазах.

- в бібліотеках «Simscape Electrical / Specialized Power Systems» більшість готових шаблонів генераторів та трансформаторів налаштовані саме на зіркове з'єднання, що дозволяє легко інтегрувати їх у складні схеми без необхідності додаткових трансформацій або введення фіктивних навантажень.

- переважна більшість вітрогенераторів мають з'єднання обмоток типу зірка.

Було обрано генератор синусоїдної форми напруги. Негативні полюси 3-х генераторів з'єднуються, позитивні підключаються до еквівалентної індуктивності та опору, що розміщені послідовно. Еквівалентний опір підключається до виходів блоку генератора, відповідно «Phase A», «Phase B», «Phase C» як зображено на рис. 3.1.

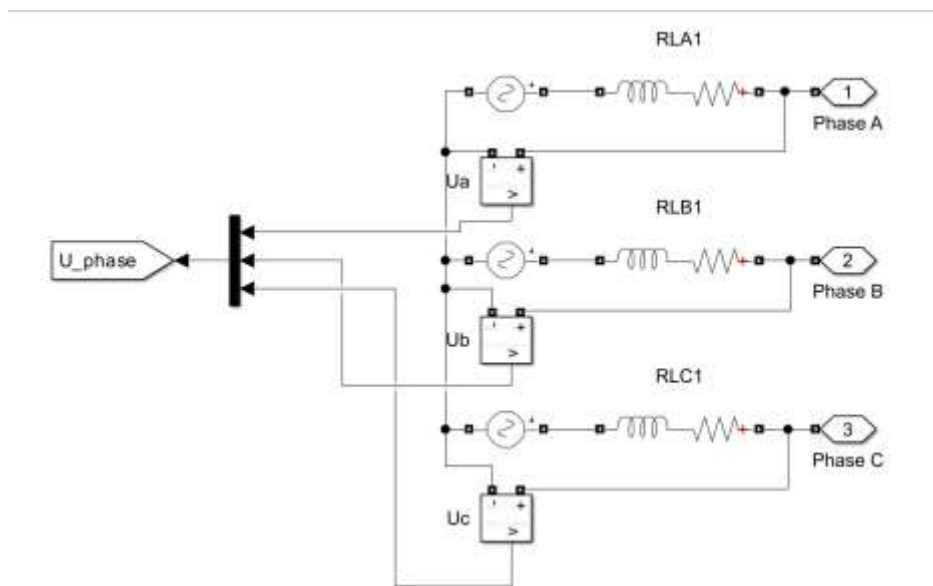


Рис. 3.1. Еквівалентний вітрогенератор

Для зручності подальших вимірювань з обмоток знімаються значення напруги та через блок «Mux» та «GoTo» виводяться як глобальні змінні.

Налаштування генератора зображені на рис. 3.2.

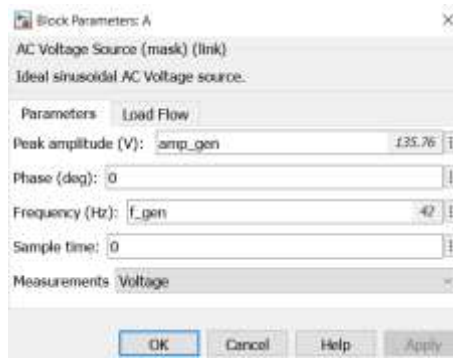


Рис. 3.2. Налаштування одного з генераторів синусоїди

Для обмотки А значення Phase (deg) дорівнює нулю, а для В та С, 120 та 240 відповідно.

Наступним блоком для побудови буде блок навантаження. Він складається з трифазного мостового випрямляча та активно-ємнісного навантаження (рис. 3.3).

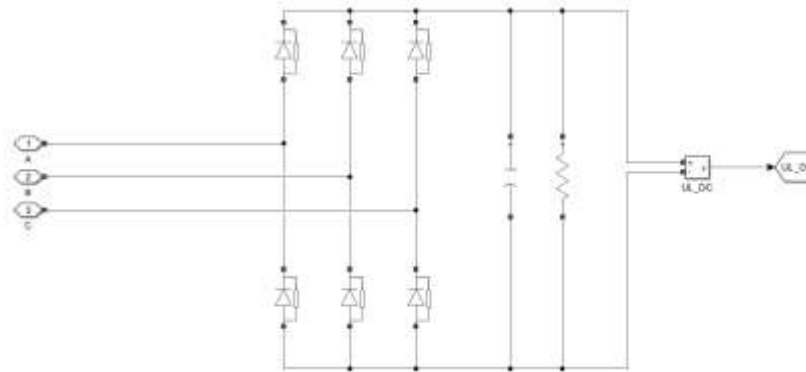


Рис. 3.3. Блок навантаження

В налаштуваннях паралельного RC блоку вказуються тип навантаження, значення активного опору та значення індуктивності. Обрано як R_L , C_L відповідно 100 [Ом] та 50 [мкФ]. Налаштування діоду є стандартними для бібліотеки та типовими для більшості випрямних діодів на практиці.

Під час побудови моделі ФКП у середовищі MATLAB Simulink важливо реалізувати точну систему вимірювання електричних параметрів. Це необхідно для аналізу ефективності роботи компенсатора, контролю режимів функціонування та верифікації моделі в цілому. На початковому етапі доцільно додати блок вимірювання фазних струмів та лінійної напруги трифазної

системи. Для цього використовуються стандартні елементи бібліотеки Simscape Electrical — зокрема, «Current Measurement» для зняття струмів у кожній фазі, та «Voltage Measurement» для фіксації напруг між лініями.

Зібрані сигнали об'єднуються за допомогою блоку *Mux*, що дозволяє передати кілька вимірних параметрів на спільний аналіз або до візуалізаційних засобів, таких як «Score» або «Display».

Додатково, для оцінки ефективності компенсації реактивної потужності в моделі реалізується окремий функціональний блок «PF calculation», що вимірює миттєві значення активної та реактивної потужностей. Він також визначає коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) та рівень ПГС. Ці параметри критично важливі для оцінки якості споживаної електроенергії та точності компенсуючого струму, який формує ФКП. Побудовані блоки з'єднанні з візуалізаційними засобами на рис. 3.4.

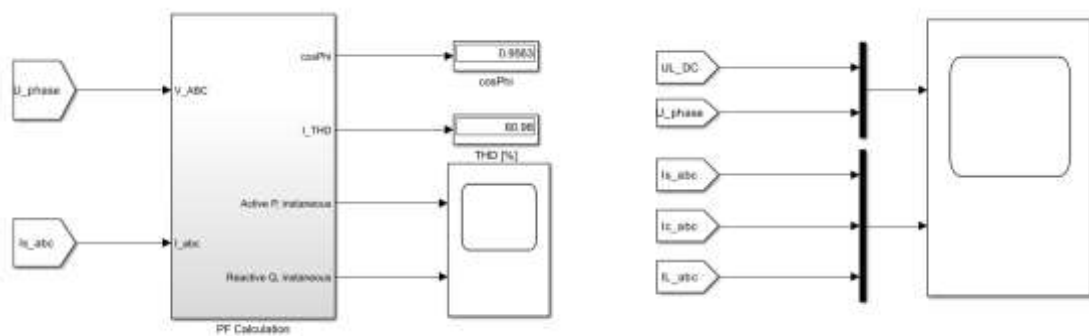


Рис. 3.4. Частина вимірювальних блоків

Розрахунок ПГС реалізується на основі блоку "Total Harmonic Distortion". Він приймає сигнал струму або напруги і на виході дає значення в межах від 0 до 1, де 0 відповідає чистій синусоїді без спотворень. Щоб перевести результат у відсоткову шкалу, вихід сигналу подається на блок "Gain", який домножує значення на 100, після чого отримується більш наочне представлення у форматі від 0 до 100 %.

Розрахунок $\cos \phi$ дещо складніший. Спочатку використовується блок "Power (3ph, Instantaneous)", який дає миттєві значення активної та реактивної потужностей. Далі, на основі цих даних, у підсистемі виконується розрахунок

повної потужності за формулою $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, після чого $\cos \varphi$ визначається як відношення активної потужності до повної. Щоб отримати усереднене значення за період, результати подаються через блок "RMS", який обчислює середньоквадратичне значення. Така реалізація дозволяє у реальному часі оцінювати якість енергоспоживання та ефективність корекції коефіцієнта потужності в моделі.

У подальшому ці значення використовуються для верифікації режимів компенсації та налаштування контролера перетворювача.

3.2 Реалізація моделі фільтро-компенсаційного перетворювача

Структура перетворювача базується на класичній трифазній схемі з окремими фільтрами на кожну фазу. Основними елементами конструкції є три індуктивності, підключені послідовно у кожну фазу мережі, що забезпечують згладжування та формування компенсуючого струму.

Комутування струмів між фазами здійснюється за допомогою шести ідеальних керованих ключів, які моделюють напівмостові транзистори. Кожен ключ шунтується зворотним діодом, що дозволяє правильно відпрацьовувати змінну природу струмів. Крім того, у ланцюг постійного струму додано конденсатор, який виконує функцію накопичення енергії, забезпечуючи можливість миттєвої реакції на зміни навантаження або компенсаційного струму. Всі керуючі сигнали до ключів зібрані в єдину шину за допомогою блоку "Mux", що полегшує подальше підключення до модуля керування.

Для контролю стану накопичувального елемента використовується блок "Voltage Measurement", який вимірює напругу на конденсаторі постійного струму. Цей параметр буде критичним при реалізації алгоритму стабілізації рівня енергії у накопичувачі (рис. 3.5).

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		47

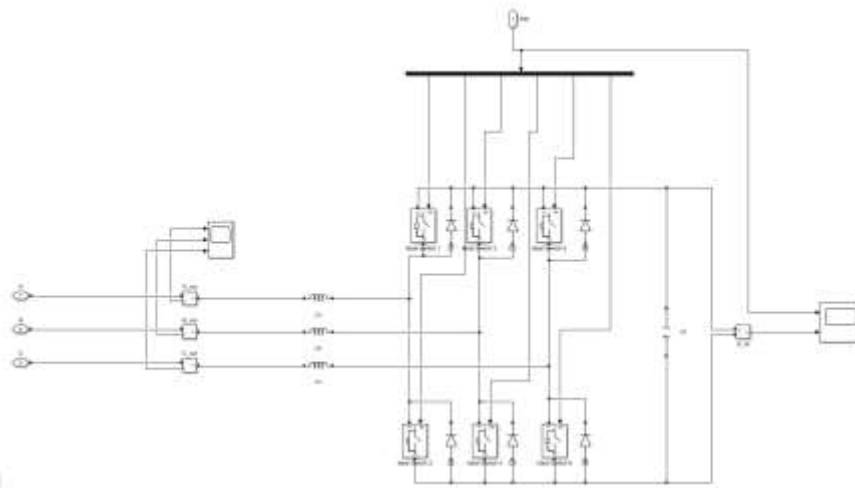


Рис. 3.5. Модель ФКП

Наступним кроком моделювання стане побудова схеми керування, яка забезпечить коректне формування широтно-імпульсної модуляції та адаптацію роботи перетворювача до умов змінного навантаження.

У фільтро-компенсаційному перетворювачі (ФКП) система керування є ключовим елементом, оскільки саме вона формує керуючі сигнали для силових ключів відповідно до поточного режиму навантаження. Основна мета такої системи — забезпечити генерацію компенсуючого струму, який наближений за формою до гармонічної компоненти спотвореного струму навантаження, але має протилежну фазу. Це дозволяє ефективно зменшити реактивну потужність і гармоніки, покращуючи загальний коефіцієнт потужності.

На сьогодні відомо кілька підходів до побудови систем керування ФКП. Серед них — метод миттєвої активної та реактивної потужності (P-Q), метод синхронного обертового векторного простору (D-Q перетворення), фазні ПІ-регулятори та алгоритми на основі спектрального аналізу струму навантаження. Кожен з підходів має свої особливості. Наприклад, метод P-Q відносно просто реалізується, проте чутливий до якості вимірювань напруги. Метод D-Q забезпечує високу точність компенсації, але вимагає наявності еталонного сигналу для синхронізації. ПІ-регулятори дозволяють реалізувати адаптивне керування, однак їх налаштування може бути нестабільним при зміні режимів.

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

Спектральні методи забезпечують глибоку компенсацію гармонік, але потребують великих обчислювальних ресурсів.

З огляду на складність реалізації повноцінної системи керування в межах даної моделі, а також з урахуванням обмеженого часу, було прийнято рішення зосередитися на побудові силової частини ФКП та забезпеченні її інтеграції з майбутньою системою керування. На поточному етапі керуючі сигнали для силових ключів подаються з фіксованим значенням, що відповідає заданому режиму компенсації. Це дозволяє провести аналіз роботи перетворювача в умовах наперед заданих параметрів, не враховуючи динамічну зміну навантаження або адаптацію до нових умов.

Такий підхід є доцільним для первинної перевірки працездатності силової схеми, тестування роботи окремих її елементів, а також подальшої інтеграції з більш складною адаптивною системою керування, яка може бути реалізована на базі мікроконтролера або DSP у наступних етапах розробки.

3.3 Результати моделювання

У даному підрозділі представлено результати двох варіантів моделювання електроенергетичної системи: в першому випадку робота здійснюється без використання фільтро-компенсаційного перетворювача, у другому — з підключеним трифазним ФКП паралельного типу. Обидві моделі побудовано в однакових умовах, з використанням одних і тих самих навантажень, джерела живлення та генератора. Це забезпечує коректне порівняння отриманих результатів, оскільки будь-які зміни у поведінці системи можуть бути однозначно інтерпретовані як наслідок роботи фільтра.

Основна мета даного моделювання полягала в тому, щоб дослідити вплив роботи фільтро-компенсаційного перетворювача на електромережу, зокрема на якість струму та рівень гармонічних спотворень у фазах. Було змодельовано характер навантаження, який створює значну нелінійність у струмах, що в свою чергу викликає підвищений вміст вищих гармонік та погіршення коефіцієнта

									Арк
									49
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата	ДП ДЕ11 03.000.ПЗ				

потужності. У другому варіанті моделі, після підключення ФКП, простежено зміну електромагнітних процесів у системі.

Особливу увагу приділено спектральному аналізу струмів у фазах. За допомогою спеціалізованих блоків середовища Simulink проведено обчислення коефіцієнта ПГС, а також аналіз розподілу амплітуд вищих гармонік. Це дало змогу кількісно оцінити ступінь покращення якості електроенергії внаслідок роботи компенсатора. Результати порівняння також демонструють зміну форми струму, зниження реактивної складової та наближення до ідеального синусоїдального режиму.

Розглянемо першу частину контрольного моделювання. Моделюється лише мережа без підключеного ФКП. На рис. 3.6 зображено лінійну напругу та фазний струм мережі.

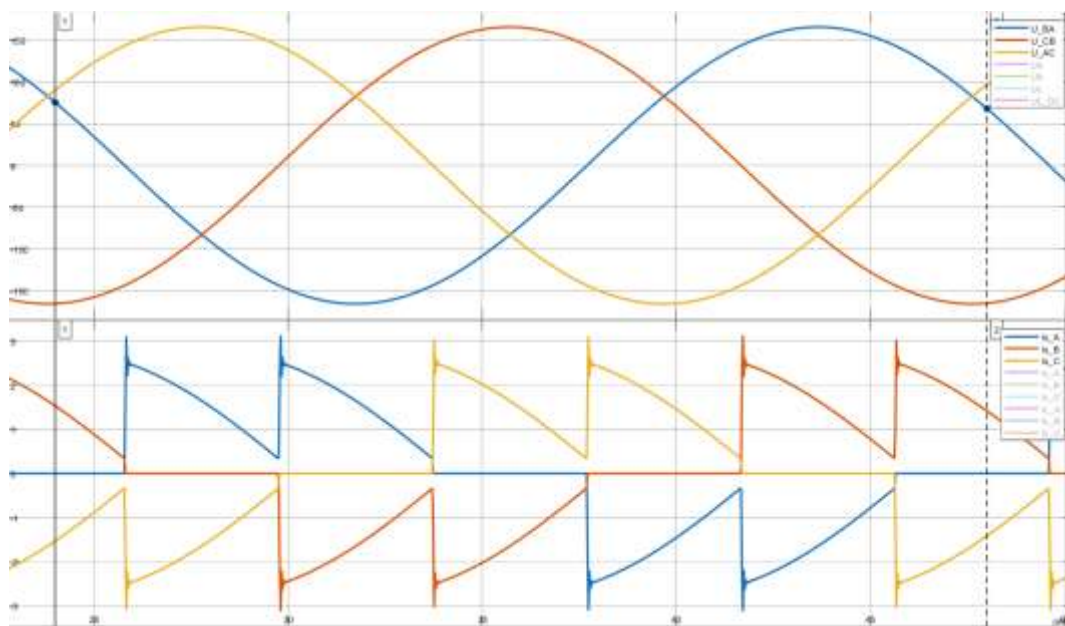


Рис. 3.6 Результати моделювання без підключеного ФКП

Фазний струм прогнозованої форми, амплітудою близько 3 [А] та імпульсним характером. Лінійна напруга має амплітуду, що обраховується за формулою (3.1):

$$U_{Line} = \sqrt{3}U_{Phase} \quad (3.1)$$

де U_{Phase} – фазна напруга.

Розглянемо напругу на конденсаторі C_L (рис. 3.7).

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата		50

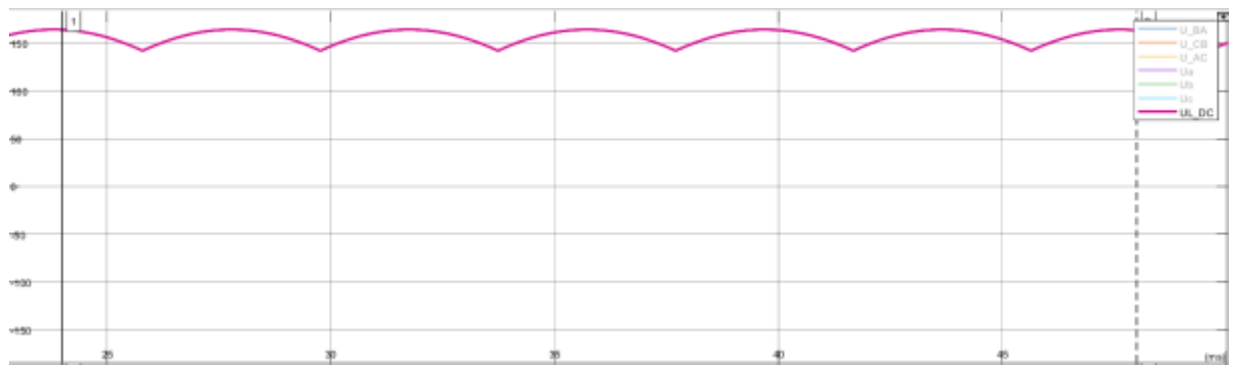


Рис. 3.7. Напряга на навантаженні після випрямляча

Діюче значення випрямленої напруги на навантаженні приблизно дорівнює 157 [В].

Розглянемо вимірювання коефіцієнту потужності $\cos\phi$ та коефіцієнту ПГС (рис. 3.8).

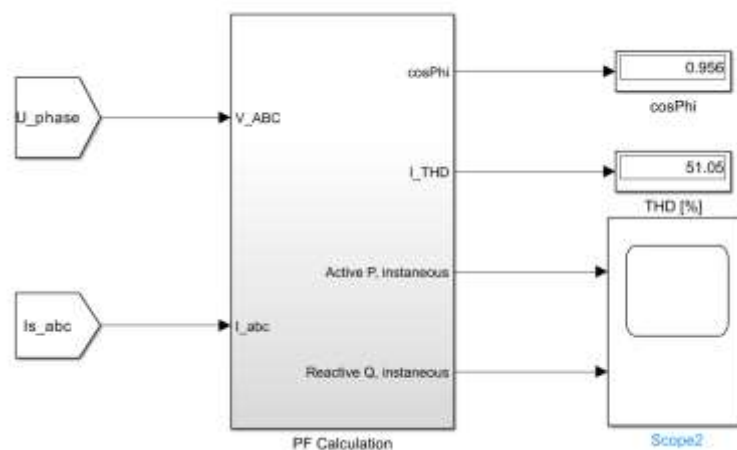


Рис. 3.8 Виміри коефіцієнту потужності та ПГС

ПГС є дещо меншим ніж теоретичні прогнози. Це обумовлено ємністю навантаження. Чим більша ємність навантаження, тим більший струм виникає при її дозаряджанні до амплітудних значень. Це призводить до більш різких імпульсів з більшою амплітудою. Проте діюче значення струму навантаження залишиться таким як і було. Косинус зсуву фаз між напругою та струмом співпадає з прогнозованим, адже навантаження у вигляді випрямляча не впливає на зсув фаз між напругою та струмом, за умови відсутності великого реактивного опору відразу на виході випрямляча. Так як ємність, що

підключена паралельно до виходу випрямляча, не має великих значень, то і вплив на зсув фаз не великий. Отже ПГС = 51%, а $\cos\varphi = 0.956$.

Моделювання проведено вдруге з метою проведення аналізу спектру гармонік. Для цього потрібно налаштувати сигнали, увімкнувши функцію «Log Signals» на потрібних сигналах. Аналіз спектру гармонік проведено для сигналу I_s для всіх фаз одночасно (рис. 3.9).

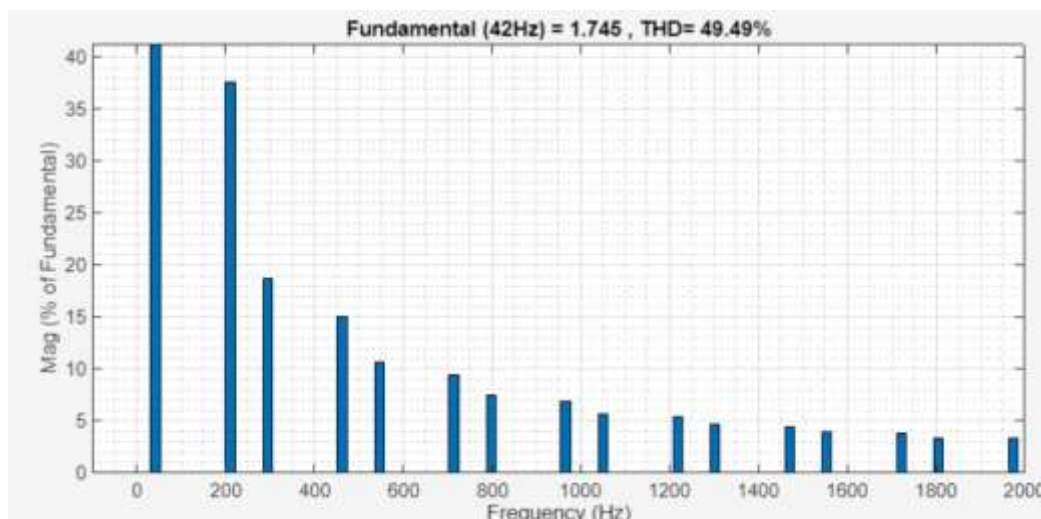


Рис. 3.9 Спектр гармонік I_s без ФКП

Тепер підключаємо ФКП паралельно до мережі вітрогенератора. Проводимо моделювання та фіксуємо отримані результати. Струм навантаження зображено на графіку (рис. 3.10).

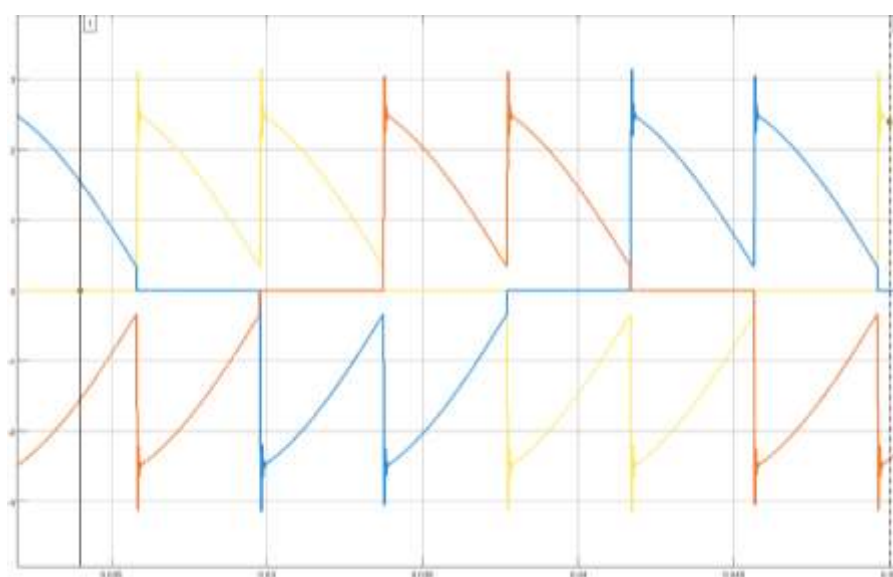


Рис. 3.10 Струм навантаження

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

Струм навантаження не змінився, так як не змінилась лінійна напруга мережі. Розглянемо моделювання з підключеним ФКП. Результати замірів напруг співпадають з напругами моделювання без ФКП. Розглянемо результати замірів струму компенсатора (рис. 3.11).

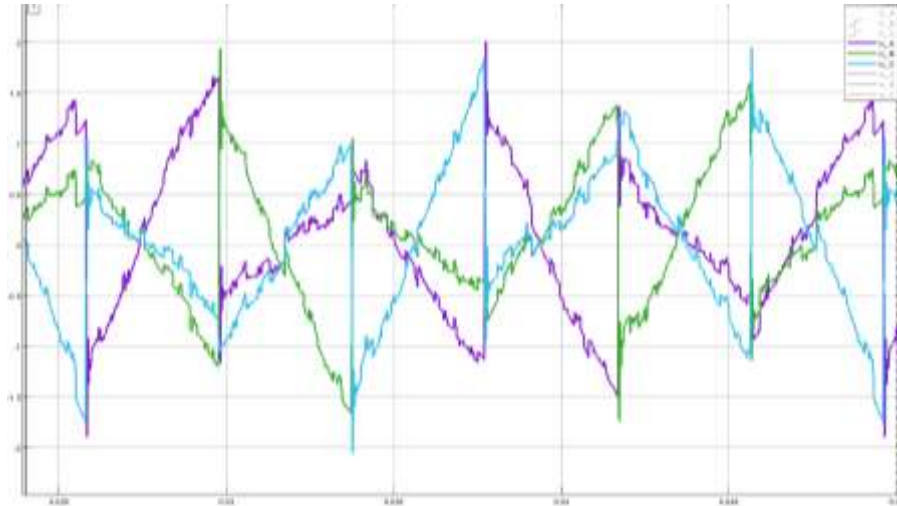


Рис. 3.11 Струм компенсатора

Струм компенсатора не ідеальний. В ньому присутні деякі високочастотні спотворення. Здебільшого такі спотворення обумовлені наявністю ШІМ сигналу, так як для коректної роботи та уникнення короткого замикання в керуючому сигналі присутні так звані мертві зони. Це часові зони при яких всі ключі розімкненні. В ШІМ це виглядає як затримка перед імпульсом та обмеження коефіцієнту заповнення таким чином, щоб він ніколи не дорівнював 1. На рис. 3.12 зображено струм генератора.

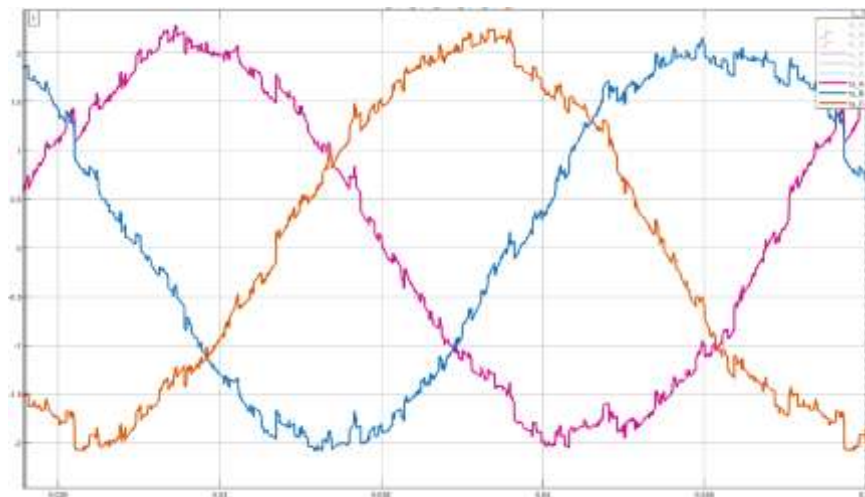


Рис. 3.12. Струм генератора

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

Як можна бачити струм генератора є сумою струмів навантаження та компенсатора, що означає відповідність теоретичним розрахункам. Струм генератора незначним чином зашумлений високочастотними завадами, проте їх роль не критична. Розглянемо коефіцієнт потужності генератора та коефіцієнт ПГС (рис. 3.13).

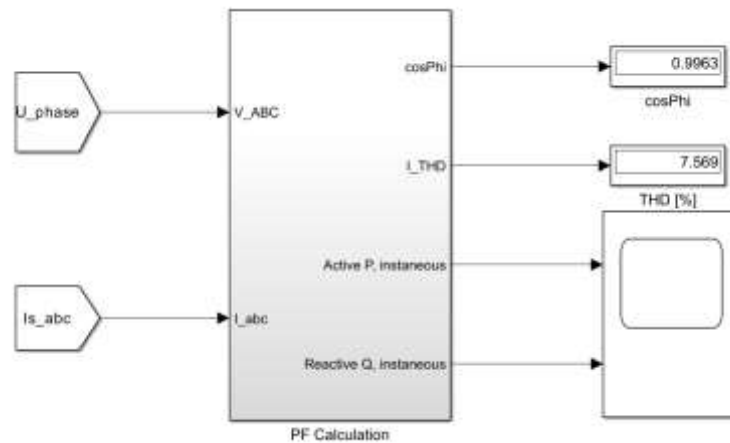


Рис. 3.13. Вимірювання $\cos\phi$ та ПГС з підключеним ФКП

З рис. 3.12 можна підтвердити позитивний вплив ФКП на якісні показники струму генератора. Розглянемо спектр гармонік за допомогою швидкого перетворення Фур'є (рис. 3.14).

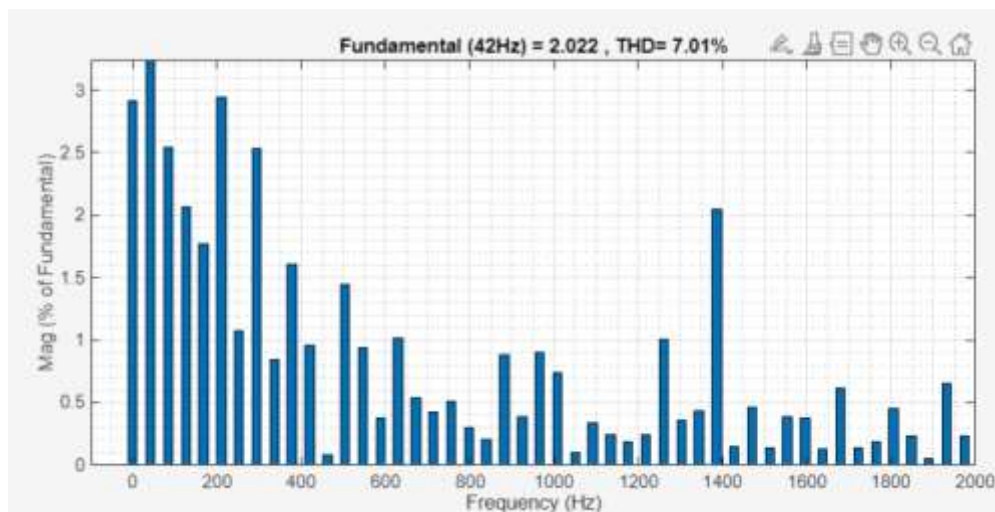


Рис. 3.14 Спектр гармонік після підключення ФКП

Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата

себе три дроселі, шість керованих ключів, діоди та конденсатор енергетичного накопичення.

Зважаючи на складність реалізації повнофункціональної системи керування в рамках дипломного проєкту, керуючі сигнали для ключів було попередньо визначено на основі заданих умов, що дозволило зосередитися на верифікації працездатності та ефективності силової частини пристрою. Основною метою на даному етапі була побудова і налагодження архітектури підключення, яка надалі зможе інтегрувати повноцінну систему керування в рамках майбутніх етапів досліджень.

Результати вимірювання після підключення ФКП демонструють суттєве зменшення гармонічних спотворень у струмах навантаження. Значення ПГС знизилося з початкового рівня 51% до 7%, що свідчить про ефективну фільтрацію вищих гармонік. Аналогічно було зафіксовано покращення показника $\cos\varphi$ з 0,956 до 0,9, що вказує на більш ефективне використання активної потужності та зменшення реактивної компоненти. Спектральний аналіз струму підтвердив суттєве зниження амплітуд вищих гармонік, а також наближення форми струму до синусоїдальної.

З метою порівняльного аналізу отримані результати були представлені у вигляді графіків, що демонструють форму струму, значення активної та реактивної потужності, а також динаміку коефіцієнта потужності протягом періоду моделювання. У режимі без ФКП форма струму мала значні спотворення, а миттєва реактивна потужність коливалась з високою амплітудою, що викликало додаткове навантаження на генератор та мережу. У режимі з ФКП форма струму стабілізувалася, амплітуда реактивної потужності зменшилася, а активна потужність передавалася більш ефективно.

Покращення електричних характеристик особливо помітні при аналізі середньоквадратичних значень за допомогою відповідних блоків вимірювання RMS. Зниження пульсацій напруги на конденсаторі накопичувача підтвердило стабільну роботу інвертора, а значення напруги залишалось в межах, визначених у розділі 2 для безпечного функціонування ключових елементів.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		56

керування. З огляду на складність її реалізації та часові обмеження, керування наразі здійснюється у спрощеному вигляді з фіксованими параметрами.

Було проведено серію експериментів для оцінки впливу ФКП на якість електроенергії. Порівняльний аналіз режимів з та без ФКП продемонстрував суттєве покращення електротехнічних показників: зниження гармонічних спотворень струму та підвищення коефіцієнта потужності. Це підтверджує працездатність моделі та її потенціал для подальших досліджень, зокрема у напрямку впровадження адаптивних алгоритмів керування.

Таким чином, поставлені завдання цього етапу проєкту виконані: розроблено повноцінну модель трифазної енергосистеми з елементами компенсації та створено основу для майбутньої оптимізації та вдосконалення ФКП.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>58</i>

ВИСНОВКИ

У межах даної дипломної роботи було здійснено комплексне дослідження проблем ефективності енергопостачання від вітрогенераторів та запропоновано технічне рішення у вигляді застосування паралельного фільтро-компенсаційного перетворювача (ФКП). На основі огляду сучасного стану вітроенергетики в Україні та світі визначено актуальність підвищення якості електроенергії, зокрема у частині зниження гармонічних спотворень та покращення коефіцієнта потужності в системах на базі вітрогенераторів.

Перший розділ був присвячений аналізу існуючих підходів до компенсації реактивної потужності. Було проведено порівняння пасивних та активних методів, окрему увагу приділено перевагам саме активної компенсації. Встановлено, що паралельний ФКП є доцільним рішенням для систем з нестабільним навантаженням, притаманним вітроенергетиці. Обґрунтовано вибір такої структури як найбільш ефективної для покращення якості електроенергії в розподілених системах.

У другому розділі детально розглянуто принцип роботи трифазного паралельного ФКП, охарактеризовано режими його функціонування та побудовано аналітичну модель для розрахунку струмів у силових елементах. Проведено попередній вибір елементної бази на основі технічних параметрів системи, що дозволяє реалізувати перетворювач у вигляді фізичного пристрою за умови подальшої оптимізації.

У третьому розділі було побудовано і досліджено імітаційну модель трифазної системи з вітрогенератором у середовищі MATLAB Simulink. Розроблено як базову модель генератора з навантаженням, так і модель паралельного ФКП із відповідними вимірювальними засобами. Проведено моделювання у двох режимах — із компенсатором та без нього. Результати показали, що використання ФКП призводить до зменшення рівня гармонічних спотворень та підвищення коефіцієнта потужності, що свідчить про ефективність запропонованого технічного рішення. У моделі також реалізовано

									Анк
Змн	Анк	№ локум.	Пілпис	Дата	<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>				59

базову архітектуру для подальшого підключення адаптивної системи керування, що є перспективним напрямом для майбутніх досліджень.

Отже, поставлену в роботі мету досягнуто: розроблено структурну, математичну та імітаційну моделі трифазного паралельного фільтро-компенсаційного перетворювача, підтверджено його здатність підвищувати якість електроенергії у системах з вітрогенераторами, а також створено передумови для подальшої реалізації повнофункціональної системи керування.

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		<i>60</i>

7. Private sector leadership: Driving efficiency progress [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.iea.org/> (дата звернення: 04.06.2025);
8. Децентралізація енергосистеми - рецепт порятунку в умовах війни і не тільки [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3894379-decentralizacia-energosistemi-recept-poratunku-v-umovah-vijni-i-ne-tilki.html> (дата звернення: 04.06.2025);
9. Що таке децентралізована генерація електроенергії [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/shcho-take-detsentralizovana-heneratsiia-elektroenerhii> (дата звернення: 04.06.2025);
10. Мала вітроенергетика: тенденції розвитку [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://energefficiency.in.ua/stati/vozobnovlyamaya-energiya/100-mala-vitroenergetika-tendentsiji-rozvitku.html> (дата звернення: 04.06.2025);
11. Типи вітрових електростанцій (ВЕС) та їх різниця [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://iknet.com.ua/uk/article/types-of-WPP> (дата звернення: 04.06.2025);
12. Закон Беца [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%91%D0%B5%D1%86%D0%B0 (дата звернення: 04.06.2025);
13. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
14. Bogdan Kushlyk. Чесний 2-кВт горизонтальний вітряк FT-2000L2, з діаметром 3.2м, розпаковую, показую детально [Відео]. YouTube. 2024. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=fVJOleqbwRs> (дата звернення: 12.06.2025).
15. Modern Ukrainian Homestead. True power 2 kW wind turbine for home FT-2000L2 (3.2 m dia) arrived - unboxing, partial assembly [Відео]. YouTube. 2024. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=y8yXH5hVNpc> (дата звернення: 12.06.2025);

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	Арк
Змн	Арк	№ локум	Пілпис	Дата		62

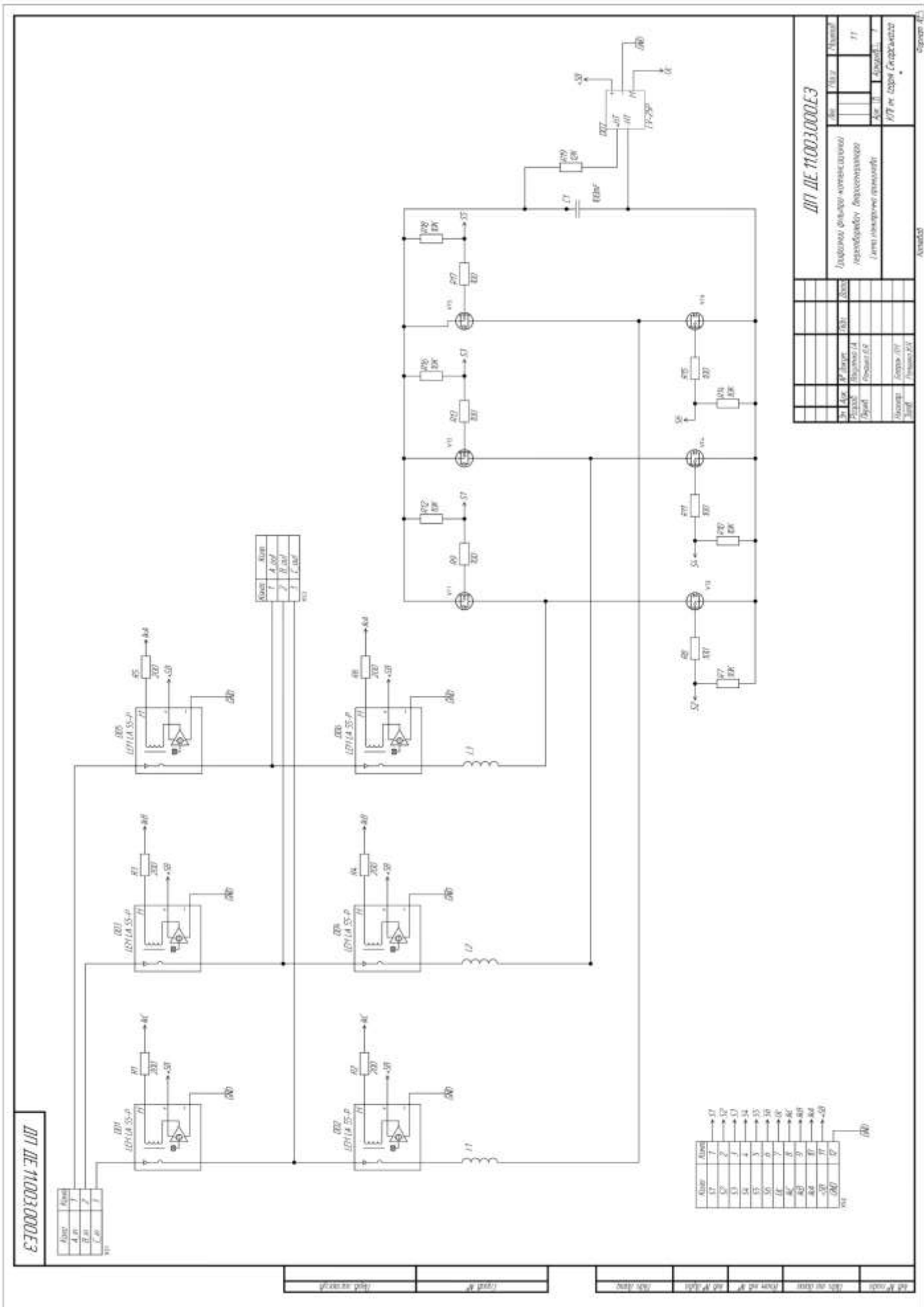
22. Визначення форми задаючого струму компенсатора при роботі вітрогенератора на випрямниче навантаження [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1103/978> (дата звернення: 01.06.2025);

23. Альохін О.О. Асинхронний електропривод з паралельним активним фільтром у системі живлення [Дипломна робота]. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Київ, 2020. 84 с.

24. Розрахунок фільтро-компенсуючого перетворювача з зарядом акумулятора за середніми значеннями струму та напруг [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://elc.kpi.ua/old/article/view/81637> (дата звернення: 01.06.2025);

					<i>ДП ДЕ11 03.000.ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ локум.</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>		64

ДОДАТОК В



DZ1 DE 11003.0001E3		№	Исполн.	Масштаб
№	Лист	№	Исполн.	1:1
Дирекция филиала «Иркутская энергосеть» Иркутской области		№	Исполн.	
Деп. энергетического планирования		№	Исполн.	
Исполн. / Проверен		1977 г. 03.04. С.С.С.Р.		
Лист 1 из 1		Иркутск		

Позначе	Найменування	Кільк.	Примітки
	<i>Датчики</i>		
<i>DD1-6</i>	<i>LEM LA55-P, LEM S.A</i>	<i>6</i>	
<i>DD7</i>	<i>LV 25-P/SP5, LEM S.A</i>	<i>1</i>	
	<i>Котушки індуктивності</i>		
<i>L1-3</i>	<i>L-0805 500 мкГн 10% EPCOS</i>	<i>3</i>	
	<i>Резистори</i>		
<i>R8,R9,R11</i>	<i>R-0805 0,125 Вт 100 Ом 5%</i>	<i>6</i>	
<i>R1-R6</i>	<i>R-0805 0,125 Вт 200 Ом 5%</i>	<i>6</i>	
<i>R7,R10, R12,R14,</i>	<i>R-0805 0,125 Вт 10 КОм 5%</i>	<i>8</i>	
<i>R19</i>	<i>R-0805 0,125 Вт 12 КОм 5%</i>	<i>1</i>	
	<i>Роз'єми</i>		
<i>XS1</i>	<i>KLS1-207-1-12-S, KLS</i>	<i>2</i>	
<i>XS2, XS3</i>	<i>1922640, Phoenix Contact</i>	<i>2</i>	
	<i>Транзистори</i>		
<i>VT1-VT6</i>	<i>FHP20N40 273 Вт 20 А 400 В</i>	<i>6</i>	

					<i>ДП.ДЕ11.003.000 ПЕЗ</i>				
<i>Із</i>	<i>Ли</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпи</i>	<i>Дата</i>					
<i>м</i>	<i>с</i>		<i>с</i>						
<i>Розро</i>	<i>б.</i>	<i>Іван</i> <i>ВАКУЛЕНК</i> <i>О</i>			<i>Трифазний фільтро-</i> <i>компенсаційний.</i> <i>перетворювач</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркушів</i>	<i>Аркушів</i>	
<i>Переві</i>	<i>р</i>	<i>Володимир</i> <i>РОМАШКО</i>					<i>1</i>	<i>1</i>	
<i>Н.конт</i>	<i>р</i>	<i>Лариса</i> <i>БАТРАК</i>				<i>КПІ ім. Ігоря</i> <i>Сікорського, ФЕЛ,</i>			

<i>Затвер д</i>	<i>Володимир РОМАШКО</i>			<i>вітрогенератора Перелік елементів</i>	<i>ЕПС, гр. ДЕ-11</i>
---------------------	------------------------------	--	--	--	-----------------------

S U M M A R YThree-Phase Active Power Line Conditioner for a Wind Generator

Despite the active global transition to renewable energy sources and the growing deployment of wind power plants, the issue of maintaining high power quality remains one of the most significant technical challenges associated with integrating wind energy into existing electrical grids. Wind turbines, by their physical and operational nature, generate electricity under highly variable environmental conditions — primarily due to fluctuations in wind speed and turbulence. This variability not only affects the output power level but also introduces distortions in current and voltage waveforms, resulting in a non-sinusoidal shape of the injected power into the grid.

These distortions typically manifest as higher-order harmonics and phase shifts between current and voltage, both of which lead to a decline in power quality. Harmonic components increase the effective current in the system, which causes additional losses in transmission lines and transformers, accelerates the aging of insulation materials, and can trigger malfunctions in sensitive equipment such as industrial controllers or medical devices. Simultaneously, the presence of reactive power — especially under partial loading or fluctuating generation — reduces the power factor, which results in inefficient energy usage, unnecessary stress on generators and transformers, and the need for oversized electrical infrastructure to handle apparent power instead of purely active power.

Moreover, traditional passive methods of compensation, such as LC filters or capacitor banks, are often insufficient or ineffective under such dynamically changing conditions, as they are usually designed for specific load characteristics and fixed frequencies. In contrast, wind energy systems demand highly adaptive and fast-reacting solutions that can adjust to changes in real time. Therefore, the use of advanced power electronic devices — particularly active filters and

compensators based on IGBT or MOSFET switches and real-time control algorithms — becomes crucial for maintaining acceptable levels of total harmonic distortion (THD), power factor, and voltage stability in the grid.

Active filter-compensating converters are capable of continuously analyzing grid conditions and synthesizing compensation signals that precisely cancel out unwanted harmonic components and reactive currents. When integrated into wind turbine systems, such converters can significantly improve the quality of power fed into the grid, ensuring compliance with power quality standards (such as IEEE 519 or IEC 61000) and supporting the reliable operation of both the generation source and the connected load. Thus, improving power quality through active compensation not only enhances energy efficiency and equipment longevity but also plays a key role in enabling the widespread adoption and grid stability of renewable energy technologies such as wind power.

This diploma project is focused on the development and modeling of a three-phase parallel filter-compensating converter (PFC) designed to correct the power factor and filter current harmonics in a wind power system. The main goal is to theoretically justify the use of this type of converter, perform a detailed calculation of its electrical characteristics, and build a mathematical model to verify its efficiency under typical operating conditions.

The object of this study is a wind energy conversion system that operates in conjunction with a three-phase power grid under nominal wind speed and voltage conditions. This system represents a typical configuration of a small to medium-capacity wind turbine connected to the distribution network, where fluctuations in wind intensity and varying load demands result in deviations from ideal power quality parameters. Such deviations commonly manifest in the form of non-sinusoidal current waveforms, reactive power flow, and voltage distortions, all of which can degrade the performance and reliability of the electrical grid.

The subject of the study is the design, theoretical analysis, and simulation-based modeling of the power stage of a parallel active filter-compensating converter (PFC). This converter is intended to mitigate the aforementioned issues

by dynamically compensating for reactive power and suppressing current harmonics in real time. Its primary function is to maintain the sinusoidal shape of grid current, reduce the total harmonic distortion (THD), and improve the power factor, especially in systems with nonlinear or fluctuating loads.

The project is structured into three main chapters. The first chapter addresses the theoretical background and motivation for using active power filters in wind energy systems, including a review of current technologies and trends. The second chapter presents a detailed analysis of the converter's operating principles, electrical characteristics, and the selection of key component values. The third chapter focuses on the creation of a simulation model to evaluate the converter's performance and validate its effectiveness under realistic working conditions.

In the first section, an overview of wind energy development trends in the world and in Ukraine is presented. Various classifications of wind turbines are described, with attention given to their efficiency and energy losses in power electronics. A comparative analysis of passive and active power factor correction methods is provided, with a focus on their respective limitations and advantages. It is substantiated that parallel filter-compensating converters are the most effective solution for dynamic harmonic compensation and reactive power correction in wind turbine systems.

The second section is dedicated to the theoretical analysis of the converter's operation. It includes the definition of system parameters, explanation of operating principles, and the functional behavior of the PFC in various modes. A detailed switching analysis of power transistors is carried out, covering all current flow intervals within one grid cycle. Additionally, analytical expressions for key electrical quantities are derived, and the ratings of components such as inductors, capacitors, and switching devices are calculated based on the working conditions and compensation requirements. Although the full control system was not implemented, a simplified algorithm for PWM modulation and transistor gating was proposed for use in future improvements.

The third section presents the process of building a simulation model in the MATLAB/Simulink environment. A model of a nonlinear three-phase load powered by a wind generator was developed to realistically reflect power quality issues. A parallel filter-compensating converter was integrated into this system. Simulation experiments were performed using an ideal sinusoidal reference current instead of a real-time control system, in order to test the potential effectiveness of the converter hardware under ideal conditions. The simulation results confirmed the expected reduction in harmonic distortion and the ability to maintain sinusoidal current waveforms in the presence of nonlinear loads. RMS current values before and after compensation were compared to assess the improvement in power quality.

As a result of the diploma project, a functioning model of a three-phase filter-compensating converter for a wind power system was designed and tested in a simulation environment. The theoretical foundations of the converter's operation were confirmed, the ratings of its key power components were calculated, and its expected effectiveness was demonstrated under simulated conditions. While the real-time control algorithm remains to be implemented in future work, the presented results form a reliable basis for the further development of a complete hardware-software system for active compensation in renewable energy applications.

The developed model of the parallel active filter-compensating converter has practical application potential in the field of distributed power generation, particularly in systems based on renewable energy sources such as wind turbines. In such systems, ensuring high-quality energy supply is especially important, given the inherent variability and nonlinearity of wind energy conversion. The converter model, which was designed to operate in a three-phase grid-connected configuration, demonstrates the ability to dynamically compensate for reactive power and reduce current harmonic distortion, which are critical factors for maintaining voltage stability and increasing the overall efficiency of power transfer in the grid.

This converter is particularly relevant for decentralized or hybrid power systems, where multiple renewable energy sources and loads operate simultaneously, often resulting in complex power quality issues. The proposed model enables targeted compensation by injecting an appropriate current waveform into the point of common coupling, thereby improving the power factor and reducing the burden on central compensation infrastructure. Moreover, it allows for flexible scalability and adaptation to different types of renewable sources, including photovoltaic systems and microturbines, in addition to wind turbines.

The simulation results obtained during the course of this study not only confirm the viability of the proposed converter topology but also provide valuable insight into the dynamic behavior of the system under various operating conditions. These results can serve as a theoretical foundation and practical guideline for the further development of digital real-time control systems, which are essential for the practical implementation of active filters in hardware. In particular, the waveform analysis, response times, transient behavior, and harmonic suppression metrics derived from the simulation can inform the selection of digital signal processors (DSPs), microcontrollers, and control algorithms required to implement the converter in real conditions.

Furthermore, the insights gained from the model can contribute to the creation of adaptive control strategies that respond in real time to fluctuations in load and generation. This is especially relevant for modern smart grid applications, where bidirectional power flow and distributed energy management demand advanced compensation and filtering solutions. The presented converter model, therefore, not only represents a theoretical tool but also has practical relevance as a building block for future energy-efficient, grid-friendly wind energy systems.

Keywords: electronics, wind turbine, reactive power, power factor, harmonic filter, converter.

Summary of the project: 5 pages